



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Kumulative Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)  
Technische Universität Darmstadt (D 17)  
Fachbereich 3: Humanwissenschaften  
Institut für Psychologie

## **Der Einfluss von Luftdruckschwankungen im Zug auf den Passagierkomfort –**

**Analyse kontinuierlicher Bewertungen in ICE-3 und Druckkammer sowie  
Definition von Toleranzgrenzwerten**

vorgelegt von Dipl.-Psych. Sandra Schwanitz  
geboren in Siegburg

Darmstadt, 2012

Eingereicht am 13. September 2012  
Disputation am 06. Dezember 2012

Referent: Prof. Dr. Joachim Vogt  
Korreferent: Prof. Dr. Ralph Bruder

## ***Danksagung***

Zunächst möchte ich meinen herzlichsten Dank an Prof. Dr. Joachim Vogt aussprechen, der durch seine Bereitschaft, die universitäre Betreuung der Arbeit zu übernehmen, eine Promotion erst möglich gemacht hat und stets unterstützend zur Seite stand.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr. Ralph Bruder, dass er sich als Korreferent dieser Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Ein ganz besonderer Dank gebührt zudem Dr. Mathias Basner und Dr. Christian Piehler, denen ich die Gelegenheit zur Promotion im Rahmen des Projekts „Next Generation Train“ am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu verdanken habe.

Einen ganz herzlichen Dank richte ich auch an meine Co-Autoren Dr. Mathias Basner, Vinzent Rolny, Christina Samel und Martin Wittkowski für ihre fachliche Expertise und die gute Zusammenarbeit.

Weiterhin danken möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen Helga Buess, Dr. Eva-Maria Elmenhorst, Alex Hoff, Astrid Linke-Hommes, Norbert Luks, Louise Mawet, Ernst-Wilhelm Müller, Gernot Plath, Dr. Julia Quehl, Daniel Rooney, Stefan Schmitt, Susanne Stein, Martin Vejvoda und Prof. Dr. Jürgen Wenzel der Abteilung Flugphysiologie am Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des DLR für ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Ein besonderer Dank für die fachliche und vor allem auch menschliche Unterstützung geht an Dr. Sibylle Pennig.

Auch meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für ihre stete Ermutigung und ihren Glauben an das Gelingen dieser Arbeit danken. Anna-Lena Bernhardt danke ich zudem für ihre Beteiligung an der letzten Fehlersuche.

Zu guter Letzt danke ich allen Bahnreisenden und Probanden recht herzlich für ihre Teilnahme an der Befragung bzw. ihren Einsatz im Rahmen der Feld- und Laborstudien.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>Summary .....</b>	<b>3</b>
<b>Teil A: Synopsis.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Hintergrund der Studien .....</b>	<b>10</b>
2.1. Einbettung der Studien in das Projekt „Next Generation Train“ (NGT).....	10
2.2. Physiologische Wirkung von Luftdruckschwankungen auf den Passagier.....	12
2.3. Bisherige Studien und Richtlinien zu Luftdruckschwankungen im Zug.....	13
<b>3. Studiendesign.....</b>	<b>17</b>
<b>4. Operationalisierung des Komfortbegriffs .....</b>	<b>19</b>
4.1. Versuchsbedingungen A und B: Feldfahrten und Simulation in der Druckkammer.....	20
4.2. Versuchsbedingung C: generische Drucksprungprofile in der Druckkammer.....	21
<b>5. Überblick über die Originalarbeiten.....</b>	<b>22</b>
5.1. Überblick über Artikel I: „Pressure variations on a train – Where is the threshold to railway passenger discomfort?“.....	23
5.2. Überblick über Artikel II: „Continuous assessments of pressure comfort on a train – A field-laboratory comparison“.....	28
<b>6. Zusammenfassende Diskussion .....</b>	<b>31</b>

<b>7. Literatur.....</b>	<b>34</b>
<b>Teil B: Originalarbeiten.....</b>	<b>40</b>
<b>Artikel I:</b> Pressure variations on a train – Where is the threshold to railway passenger discomfort? .....	<b>41</b>
<b>Artikel II:</b> Continuous assessments of pressure comfort on a train – A field- laboratory comparison .....	<b>70</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>93</b>

## Zusammenfassung

Im Zuge der steigenden Mobilität und Globalisierung erlangt der Passagierkomfort einen immer höheren Stellenwert bei der Wahl eines Verkehrsmittels. Der Fokus der vorliegenden Studien liegt auf dem Einfluss von Luftdruckschwankungen in Hochgeschwindigkeitszügen auf das Komfortempfinden von Bahnreisenden. Aerodynamische Effekte entstehen insbesondere bei Tunneldurchfahrten und pflanzen sich je nach Dichtigkeit des Zuges ins Wageninnere fort, wo sie als Druck auf den Ohren spürbar werden. Geänderte Richtlinien für den Tunnelbau in Deutschland führen zu einem Anstieg auftretender Luftdruckschwankungen. Diese aktuelle Entwicklung erfordert eine Analyse von Grenzwerten, die aus Sicht der Passagiere für eine komfortable Reise nicht überschritten werden sollten. Bis dato existierende Druckkomfortkriterien erfassen nur einen Teilbereich möglicher aerodynamischer Effekte.

Eine Fragebogenerhebung mit 262 Passagieren (Dienstreisende und Berufspendler in ICE und S-Bahn) diente als deskriptive Vorstudie zur Erfassung der derzeitigen Relevanz von Luftdruckschwankungen auf den Komfort, verglichen mit weiteren physikalischen Variablen in der Fahrzeugumgebung. Insbesondere klimatische und räumliche Aspekte konnten als entscheidende Determinanten des Komforts identifiziert werden. In einem Cross-Over Design wurden darüber hinaus 31 gesunde Probanden in Feld- und Laborstudien unter drei Versuchsbedingungen untersucht. Im Rahmen von Realfahrten mit je sechs Probanden auf der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main wurden die auftretenden Luftdruckschwankungen aufgezeichnet. Durch Einsatz von Schiebereglern konnten die Probanden kontinuierliche Bewertungen ihres aktuell empfundenen Komforts bzw. Diskomforts in Bezug auf die Luftdruckschwankungen abgeben. Der globale Eindruck einer Fahrt (Hinfahrt bzw. Rückfahrt) wurde zudem retrospektiv am Schieberegler eingestellt sowie auf einer siebenstufigen Ratingskala erfasst („0 = überhaupt nicht unangenehm“ bis „6 = äußerst unangenehm“). In der Druckkammer „TITAN“ des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln wurde das Szenario in gleicher Probandenkonstellation nochmals untersucht, um einen methodischen Feld-Labor-Vergleich vornehmen zu können.

Die im derzeitigen Bahnbetrieb auftretenden Druckänderungen werden überwiegend toleriert. Ein Vergleich der Versuchssettings zeigt eine hohe Übereinstimmung sowohl der kontinuierlichen als auch der retrospektiven Komfortbewertungen. Dies unterstützt die ökologische Validität von Untersuchungen in der Druckkammer TITAN. Durch Berechnung einer verallgemeinerten Schätzgleichung (generalized estimating equation model, GEE) zeigt sich, dass neben Parametern des aktuellen Drucksprungs (zum Beispiel hohe Amplitude, kurze Zeitdauer, in der eine Druckänderung erfolgt) auch kurz zuvor aufgetretene Druckänderungen das aktuelle Komfortempfinden signifikant beeinflussen. In einem weiteren Laborexperiment wurden denselben Probandenkonstellationen systematisch generierte und randomisierte Drucksprungkombinationen dargeboten. Diese reichten von gerade merklichen bis hin zu im Rahmen des Gesundheitskriteriums noch zulässigen Druckänderungen. Der jeweils empfundene Diskomfort wurde hier anhand der siebenstufigen Ratingskala erfasst ("0 = überhaupt nicht unangenehm" bis "6 = äußerst unangenehm"). Mittels gemischter Regressionsmodelle konnten Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen Parametern des Drucksprungs und Diskomfortbewertungen hergestellt werden. Auch anhand der Fragebogenmethode zeigt sich, dass Drucksprünge unter anderem dann signifikant mehr Diskomfort auslösen, wenn die Amplitude hoch und die Zeitdauer des Einwirkens kurz ist. Daneben kommt es zum Beispiel bei Druckanstiegen zu einem signifikant stärkeren Diskomfortempfinden als bei Druckabfällen. Durch Festlegung einer Grenze von „3 = mittelmäßig unangenehm“ und darüber als nicht mehr komfortabel, lassen sich Toleranzgrenzwerte als nicht zu überschreitende Amplituden in einer bestimmten Zeitdauer bestimmen. Durch logistische Regressionsmodelle wurde zudem für unterschiedliche Druckänderungen der jeweils resultierende Anteil unzufriedener Passagiere vorhergesagt. Die Ergebnisse liefern Hinweise zum Einfluss bestimmter Druckänderungsparameter auf den Diskomfort der Zugpassagiere. Entscheidungsträger können sich diese zu Nutze machen, um den Anforderungen der Passagiere in Bezug auf Luftdruckschwankungen im Zug besser gerecht zu werden. Hierbei sind gewünschte Komfortbewertungen bzw. ein angestrebter Prozentsatz zufriedener Passagiere gegenüber entstehenden Kosten für eine bessere Abdichtung der Züge oder Veränderungen der Infrastruktur abzuwägen.

Die Synopsis bildet den Teil A dieser Arbeit. In Kapitel 1 wird das psychologische Konstrukt „Komfort“ eingeführt. Kapitel 2 beleuchtet den Hintergrund

der Arbeit durch eine Einbettung der Studien in das zugehörige Projekt „Next Generation Train“ des DLR. Darüber hinaus werden die physiologischen Prozesse der Wirkung von Luftdruckschwankungen auf den Zugpassagier erörtert sowie bisherige Studien und Richtlinien zum Thema Druckkomfort vorgestellt. In Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung des gewählten Studiendesigns. Daran anschließend befasst sich Kapitel 4 mit der Operationalisierung des Komfortbegriffs im Rahmen der experimentellen Studien. In Kapitel 5 ist ein Überblick über die Originalarbeiten der vorliegenden kumulativen Dissertation zu finden. Abschließend werden die Ergebnisse der Studien in Kapitel 6 einer gemeinsamen Diskussion unterzogen. Teil B beinhaltet die eingereichten Originalarbeiten.

## Summary

In times of mobility and globalization passenger comfort is getting increasingly relevant for the choice of transport mode. The present studies focus on the effect of pressure variations on high speed trains on comfort sensations of railway passengers. Aerodynamic effects predominantly occur while trains are passing through tunnels. Dependent on the train sealing quality these pressure variations propagate into the railway carriage and can be felt as pressure on the ear. Recent changes in tunnel construction guidelines in Germany will lead to an increase in pressure variations on a train. Therefore, an analysis of thresholds due to the extent of pressure variations is useful. These thresholds should not be exceeded to ensure passenger comfort. Up to now, existing pressure comfort criteria cover only parts of relevant aerodynamic effects. A questionnaire survey with 262 railway passengers (business travelers and commuters in high speed long distance trains and city trains) was conducted as a descriptive pre-study. It was meant to examine the current relevance of pressure variations for passenger comfort compared with other environmental aspects on a train. Especially climatic and spatial aspects were identified as important determinants for passenger comfort. Field and laboratory experiments with 31 healthy subjects were performed realizing a cross-over design with three experimental conditions. Real journeys were conducted on the railway track Cologne-Frankfurt/Main with six subjects each. The occurring pressure variations were recorded and continuously evaluated by the subjects using sliders. Additionally, global assessments were acquired retrospectively by

adjustments on the slider and filling in a seven-point rating scale (“0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”). The pressure chamber “TITAN” of the Institute of Aerospace Medicine at the German Aerospace Center (DLR) in Cologne served for simulating the train ride scenario with the same constellation of subjects to realize a methodological field-laboratory comparison.

Pressure variations that are recently occurring on railway journeys are mostly tolerated. A comparison of the experimental settings reveals a high congruency both with regard to continuous as well as retrospective assessments. This result supports the ecological validity of the pressure chamber TITAN. A generalized estimating equation model (GEE) indicates that besides attributes of current pressure changes (i.e. high amplitude, short duration of a pressure change) also pressure changes occurring in the most recent past significantly influence current discomfort assessments. In a further laboratory experiment systematic pressure change combinations were presented to the same constellations of subjects in a randomized order. Pressure changes reached from just noticeable ones to those with the maximum amplitude acceptable according to existing health criteria. Perceived discomfort was acquired using a seven-point rating scale (“0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”). Dose-response relationships between pressure change attributes and discomfort assessments were generated by means of mixed regression models. In this case, higher amplitudes and shorter durations also result in significantly higher discomfort. Furthermore, pressure increases compared to pressure decreases have a significant effect on discomfort sensations. If defining an assessment of “3 = moderately uncomfortable” or above as discomfort, it is possible to derive threshold values in terms of pressure amplitudes within defined durations which should not be exceeded. In addition, logistic regression models allow a prediction of the percentage of railway passengers perceiving specific pressure changes as either comfortable or uncomfortable. The results provide insights for design engineers to meet the requirements of railway passengers due to pressure variations on a train. Desired comfort assessments by passengers, i.e. the percentage of passengers falling into the group of satisfied persons has to be weighed against a better sealing of trains or changes in infrastructure.

Part A of this thesis consists of the Synopsis. In Section 1 the psychological construct “comfort” is introduced. Section 2 focuses on the background of the thesis by embedding the studies into the associated project “Next Generation Train” of the DLR.



Moreover, the physiological processes of human perception relating to pressure variations are described as well as existing studies and guidelines regarding aerodynamic effects on a train. Section 3 comprises the design of the study. In Section 4 the operationalization of “comfort” within the experimental studies is described. Section 5 provides an overview of the journal articles which constitute the cumulative dissertation. Section 6 presents a general discussion of the findings. Part B consists of the submitted journal articles.

## **Teil A: Synopsis**

# 1. Einleitung

Die Erwartungen der Passagiere in Bezug auf die Nutzung von Verkehrsmitteln werden zunehmend differenzierter. Neben Sicherheit und Schnelligkeit gewinnen Komfortaspekte einen immer höheren Stellenwert in der Beurteilung eines Transportmittels durch den Passagier (Suzuki, 1998a). Das Komfortempfinden beeinflusst die Akzeptanz des Verkehrsträgers sowie die Wahrscheinlichkeit, diesen erneut zu nutzen oder aber zukünftig zu vermeiden (Richards, 1980). Gerade auch im Hinblick auf den Wettbewerb zwischen verschiedenen Verkehrsträgern ist es bedeutsam, den Fokus auf die Bedürfnisse des Passagiers zu richten. Ist der Passagier in hohem Maße unzufrieden mit seiner Reise, wird seine Wahl in der Konsequenz möglicherweise auf ein anderes Transportmittel fallen. Es handelt sich um ein klassisches Aufgabenfeld der Ergonomie, die Fahrzeugumgebung an den Passagier anzupassen (Oborne, 1978a).

Im Rahmen ergonomischer Fragestellungen wurde das Konzept des Komforts besonders eingehend im Hinblick auf den Sitzkomfort, unter anderem auch in der Fahrzeugumgebung, entwickelt. Einigen Autoren zufolge handelt es sich beim (Sitz-)Komfort um einen spezifischen Zustand des Wohlbefindens, in dem seitens des Individuums keine weiteren Handlungen zur Vermeidung von Diskomfort eingeleitet werden (Shackel, Chidsey & Shipley, 1969). Bis heute existiert jedoch weder eine allgemeingültige Definition des Komfortbegriffs, noch ist die Grenze von Komfort zu Diskomfort abschließend geklärt. Häufig wird von einer eindimensionalen Skala mit den Endpolen Komfort und Diskomfort ausgegangen (zum Beispiel Richards, Jacobson & Kuhlthau, 1978; Richards, 1980; Shackel et al., 1969). Andere Autoren stehen dieser Annahme kritisch gegenüber. Hertzberg (1972) definiert Komfort als Abwesenheit von Diskomfort, als Zustand, in dem keinerlei Gefühl ins Bewusstsein tritt. In ähnlicher Weise betont Branton (1969), Komfort müsse nicht zwangsläufig von einem positiven Affekt begleitet sein. Er vertritt die Auffassung, Komfort sei – ebenso wie Gesundheit – lediglich im Sinne seiner Abwesenheit, das heißt im Sinne verschiedener Grade von Diskomfort messbar (vgl. auch Krist, 1994; Ebe & Griffin, 2000). Zhang, Helander und Drury (1996) sowie Helander und Zhang (1997) beziehen sich auf Komfort und Diskomfort ebenfalls als diskontinuierliche Konstrukte. Sie beschreiben Komfort als einen Zustand, der sich nicht zwangsläufig bei Abwesenheit von Diskomfort einstellt.

Vielmehr ist Komfort ihrer Auffassung nach mit Aspekten wie Entspannung und Luxus verbunden, mit Erfahrungen, die ursprüngliche Erwartungen übersteigen. Nach Vink und Hallbeck (2012) wird Komfort als ein angenehmer Zustand bzw. ein entspanntes Gefühl des Individuums in Bezug auf seine Umwelt beschrieben. Diskomfort ist demgegenüber als ein unangenehmer Zustand des menschlichen Körpers als Reaktion auf seine physikalische Umgebung zu verstehen.

Ungeachtet dessen, ob eine Reduktion des Diskomforts oder ein Erzeugen von Komfort in den Vordergrund gerückt wird, bleibt das übergeordnete Ziel des Designers einer Fahrzeugumgebung, den Passagier in ein Gefühl des Wohlbefindens zu versetzen, stets das gleiche (Oborne, 1978a). Slater (1985), der die Mehrdimensionalität des Konstrukts betont, nimmt eine Unterscheidung zwischen physikalischen, physiologischen und psychologischen Komfortaspekten vor. Diese müssen sich für das Wohlbefinden einer Person im Gleichgewicht befinden. Physikalische Komfortaspekte stehen fast ausnahmslos in direkter Beziehung zu physiologischen oder psychologischen Komfortaspekten und beeinflussen diese nachteilig, sobald Probleme im Bereich des physikalischen Komforts auftreten.

Fahrzeugbezogener Komfort kann nach Oborne (1978b) in einen Systemansatz und einen Verhaltensansatz untergliedert werden. Der Systemansatz betrachtet hierbei die unterschiedlichen Stationen einer Reise, die neben der Fahrt im Verkehrsmittel an sich auch die vorhergehenden oder sich anschließenden Aspekte einer Reise berücksichtigen. Zur Verdeutlichung ist der Ansatz von Mayr (1959) zu nennen, der eine Unterteilung des allgemeinen Reisekomforts in die Bestandteile Fahrkomfort, lokaler Komfort und organisatorischer Komfort vornimmt. Der Fahrkomfort wird gemeinhin als Passagierkomfort bezeichnet und meint den eigentlichen Aufenthalt im Fahrzeug selbst. Mit lokalem Komfort sind Aspekte an Bahnhöfen, Flughäfen etc. gemeint wie Warteräume, angenehmer Transfer und Ähnliches. Organisatorischer Komfort schließlich beinhaltet Faktoren wie einen zuverlässigen Service und gute Verbindungen. Im Systemansatz wird der globale Gesamteindruck einer Reise als Ergebnis der vielfältigen Erfahrungen verstanden, die vom Beginn bis zum Ende einer Reise gesammelt und integriert werden.

Der Verhaltensansatz hingegen betrachtet Komfortreaktionen von Passagieren als Reaktionen auf spezifische Umweltreize. Diesem Ansatz zufolge ist Komfort quantitativ messbar und kann mit unterschiedlichen Intensitäten des Reizinputs in

Verbindung gebracht werden. Entsprechend dieser Annahme vermeidet der Passagier unkomfortable Situationen auf seiner aktiven Suche nach Komfort (Oborne, 1978b).

Der Passagierkomfort im engeren Sinne, den Mayr (1959) auch als Fahrkomfort beschreibt, wird durch ein Zusammenwirken vielfältiger physikalischer Variablen der Fahrzeugumgebung, psychologischer Variablen und physiologischer Variablen beeinflusst. Die physikalischen Variablen sind relativ klar umgrenzt (Oborne & Clarke, 1973). Sie können nach Richards et. al. (1978) in Bewegungsfaktoren, weitere sensorische Faktoren sowie Sitz- und räumliche Faktoren klassifiziert werden. Zu den Bewegungsfaktoren gehören etwa Beschleunigungen (longitudinal, vertikal, transversal) und generelle Vibrationen. Die weiteren sensorischen Faktoren umfassen Lärm, Beleuchtung, Druck, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Belüftung, Gerüche. Bei den Sitz- und räumlichen Faktoren lassen sich Arbeitsfläche, Beinfreiheit und Eigenschaften des Sitzes (Breite, Form, Einstellung, Festigkeit) nennen. Demgegenüber erscheinen die psychologischen und physiologischen Variablen als weitaus zahlreicher und weniger gut definiert (Oborne & Clarke, 1973). Als psychologische Variablen, die das Komfortempfinden beeinflussen können, nennen Richards et al. (1978) Einstellungen, Überzeugungen, Erwartungen und Ängste des Passagiers. Alter, Geschlecht und genereller Gesundheitszustand sind mögliche Einflussvariablen auf physiologischer Ebene. Zudem ist anzunehmen, dass auch situative Faktoren wie etwa vorhergehende Erfahrungen mit dem Verkehrsmittel das Komfortempfinden einer Person beeinflussen. Physikalische Faktoren gelten in einer Fahrzeugumgebung als äußerst einflussreiche Determinanten des Komforts (Richards, 1980). Wird die Bahn als Fahrzeugumgebung betrachtet, so können nach Suzuki (1998a) zahlreiche Umweltbedingungen wie Lärm, Vibration, Temperatur und Sitzdesign zu mehr oder weniger Komfort auf Seiten der Passagiere beitragen. In der Eisenbahntechnologie wird unter dem allgemeinen Begriff des Fahrkomforts zumeist die Bewertung in Bezug auf Vibration und Beschleunigung des fahrenden Zuges verstanden. Zu Auswirkungen von Vibrationen auf den Zugpassagier wurden zahlreiche Studien durchgeführt (zum Beispiel Förstberg, Andersson & Ledin, 1998; Lee et al., 2009; Suzuki, 1998a; Suzuki, 1998b; Wan-Suk, Chang-Hwan, Weui-Bong & Sang-Hyun, 2005). Ein weiteres Gebiet, zu dem es eine Vielzahl an Forschungsarbeiten gibt, ist der akustische Komfort im Zug (zum Beispiel Hardy, 1999; Hardy, 2000; Kuwano, Namba & Okamoto, 2004; Létourneaux, Guerrand & Poisson, 2000; Park, Lee, Choi & Park, 2011; Patsouras,

Fastl, Widmann & Hölzl, 2000; Patsouras, Fastl, Widmann & Hölzl, 2002; Vernet & Vallet, 1977). Auch in Bezug auf das Sitzdesign wurden Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, dem Passagier einen möglichst komfortablen Aufenthalt im Zug zu ermöglichen (zum Beispiel Christiansen, 1997; Han, Jung, Jung, Kwahk & Park, 1998; Jung, Han, Jung & Choe, 1998).

Ein weiteres Forschungsfeld betrifft die Wahrnehmung von Diskomfort durch Luftdruckschwankungen. Dieses geriet in den Fokus der Aufmerksamkeit, als die ersten Pläne für Hochgeschwindigkeitszüge entworfen wurden (McClelland & Gawthorpe, 1986). Aktueller Forschungsbedarf besteht aufgrund neuer Richtlinien des Eisenbahnbundesamtes zum Tunnelbau (Eisenbahnbundesamt, 2008), die eine Veränderung bzw. Verschlechterung des Druckkomfortniveaus für die Bahnkunden nach sich ziehen (zu den Hintergründen vgl. Kapitel 2.1). Die Studien im Rahmen der vorliegenden Dissertation lassen sich thematisch diesem Forschungsbereich zuordnen. Sie dienen einer Abschätzung, inwieweit die aktuellen Änderungen im Bahnbetrieb den Passagierkomfort beeinträchtigen und inwieweit Gegenmaßnahmen sinnvoll bzw. notwendig erscheinen.

## **2. Hintergrund der Studien**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Studien zum Einfluss von Luftdruckschwankungen im Hochgeschwindigkeitsverkehr auf das Komfortempfinden von Bahnreisenden durchgeführt. Durch eine Einbettung der Studien in das Projekt „Next Generation Train“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird der äußere Rahmen der Dissertation dargelegt. In einem weiteren Schritt wird die generelle Wirkungsweise von Luftdruckschwankungen auf den Menschen erörtert. Darüber hinaus werden bisherige Forschungsarbeiten und Richtlinien zum Druckkomfort skizziert.

### **2.1. Einbettung der Studien in das Projekt „Next Generation Train“ (NGT)**

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) befasst sich, neben den Schwerpunkten Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Sicherheit und Raumfahrtmanagement mit dem Schwerpunkt Verkehr, in dem unter anderem Forschungsarbeiten zu

bodengebundenen Fahrzeugen angesiedelt sind. Im Zuge der steigenden Mobilität und Globalisierung sind auch die Anforderungen an Schienenfahrzeuge deutlich gestiegen. Das Projekt „Next Generation Train“ (NGT) hat sich zum Ziel gesetzt, etwaige Vorteile des Schienenverkehrs gegenüber anderen Verkehrsmodalitäten weiter auszubauen. Teilziele des Projekts betreffen zum einen eine erhöhte Sicherheit und Zuverlässigkeit der Schienenfahrzeuge, etwa durch geringeren Verschleiß im Rad-Schiene-Kontakt. Des Weiteren wird ein niedrigerer spezifischer Energieverbrauch angestrebt, der zum Beispiel durch Leichtbauweise erreicht werden soll, sowie eine erhöhte Leistungsfähigkeit etwa im Sinne einer höheren operationellen Fahrgeschwindigkeit. Ein weiterer Forschungsbereich bemüht sich um die Steigerung der Attraktivität der Schienenfahrzeuge für den Fahrgast durch einen höheren Passagierkomfort. Diesem Bereich sind die Studien der vorliegenden Arbeit zugeordnet.

Wie bereits einleitend beschrieben, gelten im Fahrzeugkontext wie etwa der Bahn neben psychologischen, physiologischen und situativen Variablen physikalische Einflussgrößen als wichtige Determinanten des Komforts (Richards & Jacobson, 1977). In der vorliegenden Arbeit steht die den physikalischen Einflussgrößen zugehörige Variable *Luftdruckschwankungen* im Vordergrund des Interesses. Aktuellen Anlass für die Studien liefert eine Richtlinie des Eisenbahnbundesamtes (2008) zum Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln. Diese besagt, dass Tunnel auf Schnellfahrstrecken mit uneingeschränktem Mischbetrieb von Reise- und Güterzügen sowie einer Länge von über 1000 Metern aus Sicherheitsgründen zukünftig eingleisig gebaut werden müssen, das heißt mit einer Röhre je Fahrtrichtung. Die mit der eingleisigen Bauweise einhergehende Verringerung des Tunnelquerschnitts wird zu einem Anstieg der Druckänderungen führen, die auf das Schienenfahrzeug wirken. Druckänderungen am Zug werden insbesondere durch Tunnelein- und -ausfahrten, aber auch durch Querschnittswechsel im Tunnel hervorgerufen. Diese Druckänderungen sind umso größer, je kleiner der freie Tunnelquerschnitt im Verhältnis zum Querschnitt des Zuges ist. Die entstehenden Druckwellen pflanzen sich mit Schallgeschwindigkeit im Tunnel fort. Durch Reflektionen am Tunnelportal sowie einen konstanten Druckabfall entlang des Zuges entstehen komplexe Szenarien sich überlagernder Druckschwankungen (Hagenah, Reinke & Vardy, 2006). Auch durch Geländehöhenunterschiede entlang einer Bahnstrecke können sich merkliche Änderungen des Umgebungsdrucks ergeben (Bopp & Hagenah, 2009). Ein weiterer Aspekt, der für das Ausmaß der Druckschwankungen

maßgeblich ist, ist die Geschwindigkeit des Zuges. Auch diese wird sich zunehmend steigern, um den Anforderungen der Fahrgäste an kurze Fahrtdauern zu entsprechen. Durch Öffnungen, zum Beispiel zwischen einzelnen Wagen oder aufgrund mangelhafter Dichtungen, werden die Druckschwankungen am Zug ins Innere des Wagens übertragen. Je nachdem, wie druckertüchtigt der Zug ist, geschieht dies mehr oder weniger gedämpft. Der Druckdichtigkeitskoeffizient  $\tau$  ist dabei ein Maß für die Zeitspanne, die benötigt wird, bis eine Druckdifferenz zwischen dem Äußeren und dem Inneren eines Zuges auf etwa 37% der ursprünglichen Druckdifferenz abgeklungen ist. Eine längere Zeitdauer indiziert eine bessere Druckertüchtigung des Zuges. Der  $\tau$ -Wert ist nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit vom Alter des Rollmaterials, Wagenkastenverformungen durch Vibrationen etc. (Hagenah et al., 2006). Das bestehende Druckkomfortniveau für die Bahnkunden wird sich aufgrund der neuen Richtlinien im Tunnelbau sowie der immer höher werdenden operationellen Fahrgeschwindigkeiten der Schienenfahrzeuge in naher Zukunft vermindern. Aufgrund dieser Tatsache in Kombination mit dem Anspruch des Projekts „Next Generation Train“, Schienenfahrzeuge hinsichtlich ihres Komforts gegenüber bestehendem Rollmaterial weiter zu verbessern, erscheint eine eingehende Analyse des Status quo des Druckkomfortniveaus sinnvoll. Zudem sollen in der vorliegenden Arbeit Toleranzgrenzwerte von Bahnreisenden hinsichtlich Luftdruckschwankungen spezifiziert werden. Dadurch können potenziell auftretende Akzeptanzprobleme der zukünftig zu erwartenden aerodynamischen Effekte während Zugfahrten frühzeitig abgeschätzt werden und gegebenenfalls Anlass zur Ergreifung von Gegenmaßnahmen liefern. Durch die Ergebnisse können wichtige Hinweise gewonnen werden, über welche Dämpfungseigenschaften ein Next Generation Train verfügen sollte, um einen ausreichenden Druckkomfort auch in Zukunft zu gewährleisten.

## **2.2. Physiologische Wirkung von Luftdruckschwankungen auf den Passagier**

Änderungen des Umgebungsdrucks werden vom Menschen insbesondere über das Trommelfell wahrgenommen. Dieses befindet sich zwischen dem äußeren Gehörgang und dem Mittelohr (Paukenhöhle). Je nach Richtung des Druckgefälles zwischen Umgebungsdruck und Druck im Mittelohr wird das Trommelfell entweder



zum äußeren Gehörgang oder zum Mittelohr hin ausgelenkt. Bei Druckabfall wird das Trommelfell nach außen gelenkt und die bestehende Druckdifferenz kann über die so genannte Eustachische Röhre, die das Mittelohr mit dem Nasenrachenraum verbindet, ausgeglichen werden (McClelland & Gawthorpe, 1986). Im Falle eines Anstiegs des Umgebungsdrucks, der das Trommelfell nach innen lenkt, sind aktive Maßnahmen zum Druckausgleich erforderlich. Abhilfe schafft Gähnen, Kauen, Schlucken oder die Valsalva-Methode (Gawthorpe, 2000). Letztgenannte Methode meint das Zuhalten der Nase bei geschlossenem Mund und stoßartiges Ausatmen, um einen Ausgleich der Druckdifferenz über die Eustachische Röhre zu erreichen (Brundrett, 2001). Sofern Druckdifferenzen am Trommelfell graduell aufgebaut werden, erfolgt der Druckausgleich im Normalfall weitgehend problemlos. Durch sehr rasch aufeinander folgende Druckereignisse, wie sie besonders auf Bahnstrecken mit zahlreichen Tunneln auftreten, können Schwierigkeiten einer rechtzeitigen „Belüftung“ des Mittelohrs durch die Eustachische Röhre entstehen. Diese schnelle Abfolge von Druckänderungen ist es, die eine Zugfahrt von einer Reise mit dem Flugzeug deutlich unterscheidet. Selbst für gesunde Personen reicht die Zeit für einen aktiven oder passiven Druckausgleich oft nicht aus (McClelland & Gawthorpe, 1986). Noch kritischer stellt sich die Situation für solche Personen dar, die zum Beispiel unter Infektionen des Hals-Nasen-Ohren-Bereichs leiden und deren Eustachische Röhre blockiert ist (Gawthorpe, 2000).

### **2.3. Bisherige Studien und Richtlinien zu Luftdruckschwankungen im Zug**

Die ersten Überlegungen zum Komfort von Zugpassagieren in Abhängigkeit von Luftdruckschwankungen entstanden in den späten 60er Jahren mit Entstehung der Pläne für Hochgeschwindigkeitszüge und den Eurotunnel, den Kanaltunnel zwischen Frankreich und Großbritannien. Bis dato existierten Forschungsarbeiten lediglich zum Einfluss des veränderten Luftdrucks beim Fliegen in großen Höhen und unter solchen Umständen, bei denen die Gefahr eines Traumas gegeben war (McClelland & Gawthorpe, 1986). In den 80er Jahren wurden seitens der damaligen Deutschen Bundesbahn in Zusammenarbeit mit British Rail Research (Derby, UK) und dem Institute for Consumer Ergonomics (Loughborough, Leicestershire, UK) Untersuchungen zum Druckkomfort in der Bahn angestellt (Gawthorpe, Glöckle &

Stroud, 1988; Glöckle & Pfretzschner, 1988; McClelland & Gawthorpe, 1986). Anlass war der Bau der Neubaustrecke Hannover-Würzburg, die über 60 Tunnel verfügt und mit Geschwindigkeiten von bis zu 250 km/h befahren werden sollte. Eine Vorhersage der zu erwartenden Luftdruckschwankungen mit Hilfe von Computermodellen zeigte eine teilweise Überschreitung der bestehenden Normen. Ziel der Deutschen Bundesbahn war es, zu untersuchen, ob die Strecke von den Bahnkunden in Bezug auf Luftdruckschwankungen akzeptiert werden würde bzw. Anhaltspunkte zu erarbeiten, inwieweit eine Abdichtung des Rollmaterials notwendig erschien (McClelland & Gawthorpe, 1986). Da lediglich ein Teil der Strecke fertig gestellt war, wurden Laboruntersuchungen mit 30 Probanden in der Druckkammer des British Rail Research durchgeführt (Gawthorpe et al., 1988; McClelland & Gawthorpe, 1986). Jeweils zwei Personen konnten gleichzeitig untersucht werden. Die Bewertungen erfolgten anhand einer siebenstufigen Skala mit Skalenbeschriftungen an den Endpolen („1 = überhaupt nicht unangenehm“ und „7 = äußerst unangenehm“). Eine Pilotstudie zeigte, dass weder Fahrtrichtung noch Dauer der Fahrt einen signifikanten Einfluss auf die Bewertungen hatten. In den Hauptstudien wurde das Segment Würzburg-Fulda herangezogen und drei Fahrten mit zum Teil unterschiedlichen Zugtypen bzw. zusätzlichen Tunneln und Zugbegegnungen unterschiedlicher Geschwindigkeiten simuliert. Auch wenn mehrheitlich moderate Bewertungen vorgenommen wurden, gab es auch solche Tunnel, die von über 10% der Probanden mit  $\geq 5$  bewertet wurden. Sowohl Zugbegegnungen als auch hohe Geschwindigkeiten zeigten sich in diesen Fällen gehäuft, eine systematische Analyse der Effekte ließ das Studiendesign jedoch nicht zu. Das zur damaligen Zeit vom British Rail Research festgelegte, jedoch nicht validierte Komfortkriterium von 30 Millibar (mbar) innerhalb von 3 Sekunden (s) wurde in einem Fall überschritten (36 mbar innerhalb von 3 s) und korrespondierte mit dem größten Prozentsatz an Probanden mit einer Bewertung von  $\geq 5$ . Es wurde der Schluss gezogen, dass bei stärkeren Druckänderungen die Wahrscheinlichkeiten für höhere Diskomfortbewertungen steigen und dass hohe Druckänderungen mit Zugbegegnungen und hohen Geschwindigkeiten einhergehen. Welche Komponenten ausschlaggebend sind, blieb ungeklärt. Nach Fertigstellung der Teilstrecke Würzburg-Fulda wurde diese als Teststrecke für Feldversuche eingesetzt (Glöckle & Pfretzschner, 1988). Der Mühlbergtunnel (5527 Meter) und der Einmalbergtunnel (1140 Meter) auf der Strecke Hohe Wart-Burgsinn wurden zur Erfassung der aerodynamischen Effekte mit Mess-

technik ausgestattet und mit einem nahezu unabgedichteten Zugtyp in Probandenversuchen durchfahren. Die Bewertungsskala war auch hier siebenstufig mit den Skalenbeschriftungen „1 = überhaupt nicht unangenehm“, „3 = ein wenig unangenehm“, „5 = ziemlich unangenehm“ und „7 = äußerst unangenehm“ (Johnson, Prevezer & Figura-Hardy, 2000). Mit steigenden Geschwindigkeiten wurden höhere Diskomfortbewertungen abgegeben. Es erfolgte jedoch lediglich eine deskriptive Angabe von Bewertungsmittelwerten. Zudem wurde ein Vergleich der Ergebnisse von realen Fahrten ohne Zugbegegnungen (200 km/h) sowie von Zugbegegnungen (250-280 km/h) in einem unabgedichteten und in einem abgedichteten Zug auf der Strecke Würzburg-Fulda mit den Ergebnissen derselben Ereignisse in der Druckkammer des British Rail Research vorgenommen. Es zeigte sich eine weitgehend zufrieden stellende Übereinstimmung der Bewertungen. Weitere Tests über längere Distanzen mit mehr Tunneldurchfahrten wurden als wünschenswert deklariert.

Das Management der Deutschen Bundesbahn initiierte überdies Untersuchungen zur Auswirkung unterschiedlicher Zugabdichtungen auf den Passagierkomfort. Es wurden verschieden abgedichtete Züge in zwei Tunneln unterschiedlicher Länge getestet. Im Ergebnis zeigte sich, dass eine stärkere Abdichtung des Zuges zu einem höheren Komfortempfinden führt und höhere Grade an Abdichtung besonders in kurzen Tunneln mit rapiden Luftdruckschwankungen sinnvoll sind. Zudem wurde 32 Probanden eine Reihe von Kombinationen aus Druckamplituden und Druckänderungsraten, definiert als Druckänderung in mbar/s, mit negativem und positivem Vorzeichen in der Druckkammer dargeboten. Die Bewertungen wurden mit Hilfe von regressions- und varianzanalytischen Methoden ausgewertet. Amplitude, Zeitdauer und Vorzeichen (Druckanstieg versus Druckabfall) erwiesen sich als bedeutsam für die Bewertung und zwar in dieser Reihenfolge. Druckanstiege wurden als unangenehmer empfunden als Druckabfälle. Die getesteten Kombinationen waren aus Kostengründen nicht vollständig und reichten bis zu einer maximalen Druckänderung von 30 mbar innerhalb von 3 s (Gawthorpe et al., 1988).

Zur Sicherstellung eines ausreichenden Druckkomforts für die Passagiere gab es auch in anderen Ländern zahlreiche Bemühungen zur Festlegung von Druckkomfortkriterien, die im Bahnbetrieb nicht überschritten werden sollten. Hierbei handelt es sich um die Definition maximal zulässiger Druckamplituden innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls. Die Existenz individueller Unterschiede in der Wahrnehmung

von Druckänderungen durch Passagiere, gerade in Bezug auf geringere Druckänderungen, führte zu inkonsistenten internationalen Richtlinien (Bopp & Hagenah, 2009). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über internationale Richtlinien zum Druckkomfort (Kim, Moon, Seok & Kim, 2008).

*Tabelle 1: Kriterien für die Prävention von Diskomfort bezüglich Druckschwankungen (vgl. Kim et al., 2008, S. 578).*

Land	Linie	Max. Druck- änderung	Max. Druck- änderungs- rate	Geschwindigkeit des Zuges (km/h)	Druck- dichtigkeit	Bemer- kungen
Japan	Shin- kansen	10 mbar	2 mbar/s	210, 240, 270	abgedichtet	
UK	Inter City	30 mbar/ 3s		160, 200	nicht abgedichtet	zwei entgegen- kommende Züge
		40 mbar/ 4s		225-300 km/h		eingleisig
	Kanal- tunnel	20 mbar/ 4s				
		35 mbar/ 4s				
Deutsch- land	Neubau- strecken	5 mbar/ 1s		240, 280 km/h	nicht abgedichtet	ein Zug
		8 mbar/ 3s				
		10 mbar/ 10s				
Italien	FS	15 mbar	5 mbar/s	High Speed	abgedichtet	
Frank- reich (1) (SNCF)	Atlantique HSL	50 mbar/ 3s				zwei entgegen- kommende Züge
Korea	Kyungbu HSR	8 mbar/ 3s		300 km/h	abgedichtet	normaler Fall
		12,5 mbar/ 3s				extremer Fall

Anmerkung: (1) Derzeit werden neue Druckkriterien einschließlich des Druckkriteriums 5 mbar/s untersucht.

Die Bestimmung einheitlicher, auf alle Passagiere gleichermaßen anwendbarer Kriterien scheint eine äußerst herausfordernde Aufgabe zu sein. Der internationale Eisenbahnverband mit Sitz in Paris (Union internationale des chemins de fer, UIC) hat einen Versuch unternommen, die divergierenden Kriterien zu vereinen und hat folgende Zeitintervalle und dazugehörige Druckamplituden definiert (Hagenah et al., 2006; UIC Leaflet 779-11, 2005):

- $\leq 5$  mbar innerhalb von 1 s
- $\leq 8$  mbar innerhalb von 3 s
- $\leq 10$  mbar innerhalb von 10 s
- $\leq 20$  mbar innerhalb von 60 s

Als medizinischen Grenzwert hat das europäische Komitee für Normung (Comité Européen de Normalisation, CEN) mit Sitz in Brüssel eine maximale Druckänderung von 100 mbar festgelegt, die zu keiner Zeit während der Durchfahrt irgendeines Tunnels überschritten werden darf (UIC Leaflet 779-11, 2005). Die beschriebenen UIC-Kriterien sind auf einen Zeitrahmen von 60 s und eine Amplitude von 20 mbar beschränkt. Zudem wird keine Differenzierung zwischen Anstiegen und Abfällen des Umgebungsdrucks vorgenommen. Im Hinblick auf zukünftige Änderungen des Druckkomfortniveaus dienen die nachfolgend beschriebenen experimentellen Studien dazu, die bestehenden Kriterien auszuweiten und einer differenzierteren und systematischeren Betrachtung zu unterziehen.

### **3. Studiendesign**

Die Dissertation lässt sich in eine deskriptive Vorstudie sowie eine experimentelle Studie mit drei Untersuchungsbedingungen in Feld und Labor gliedern. Als deskriptive Vorstudie wurde eine anonyme Fragebogenerhebung an Bahnkunden vorgenommen. Ziel war es, eine aktuelle Priorisierung von Komfortfaktoren im Bahnkontext zu erhalten. Derartige Studien lagen bis dato lediglich in Bezug auf den Flugzeugkontext vor (Jacobson & Martinez, 1974; Richards & Jacobson, 1975). Die Erhebungen fanden im Mai und August 2009 statt. Um unterschiedliche Zugtypen (ICE und S-Bahn) und die Bahnkundengruppen „Dienstreisende“ und „Berufspendler“ erfassen zu können, wurde der Fragebogen an zwei unterschiedlichen Orten in den frühen Morgenstunden (zwischen 6 und 9 Uhr) ausgehändigt. 250 Fragebögen wurden am ICE-Bahnhof Siegburg/Bonn verteilt, um in erster Linie das Bahnklientel „Dienstreisende“ abzudecken. Zudem sind dort Berufspendler anzutreffen, die mit dem ICE zur Arbeit pendeln. An einer Kölner S-Bahn-Haltestelle (Porz-Wahn) wurden weitere 250 Personen um das Ausfüllen des Fragebogens gebeten, bei denen es sich

überwiegend um Berufspendler handelte. Die Bedeutung der empirisch zu untersuchenden Einflussvariable Luftdruck für das Komfortempfinden im Vergleich zu weiteren physikalischen Variablen (z. B. Temperatur, Beinfreiheit, Beleuchtung) wurde erfasst. Darüber hinaus enthielt der Fragebogen Items zu Einstellungen zum Bahnfahren sowie zur Häufigkeit von Aktivitäten in der Bahn (siehe Anhang I: Priorisierungsfragebogen der Bahnsteigbefragung).

Im September und Oktober 2009 wurde sodann das Komfortempfinden von 31 Probanden in Abhängigkeit von der Umweltvariable Luftdruck experimentell untersucht. Im Vorhinein füllten auch diese den Priorisierungsfragebogen aus, der im Rahmen der Bahnsteigbefragung ausgeteilt worden war. In den Experimenten ging es zum einen um die Ermittlung eines Status quo des Druckkomforts für Bahnreisende. Darüber hinaus sollte eine differenziertere Betrachtung der Wirkungsweise von Luftdruckschwankungen auf den Diskomfort für eine größere Bandbreite an Druckereignissen erfolgen. Es wurden sechs Studiengruppen gebildet. Im Rahmen eines Messwiederholungsdesigns fand eine Untersuchung der jeweiligen Gruppen unter drei Versuchsbedingungen statt:

- Versuchsbedingung A: Feldstudie im ICE-3 (Neubaustrecke Köln-Rhein/Main) zur Evaluation des Druckkomforts unter derzeitigen Reisebedingungen
- Versuchsbedingung B: Simulationsstudie in der Druckkammer TITAN des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin mit Reproduktion der in der Feldstudie gemessenen Druckverläufe
- Versuchsbedingung C: Laborstudie in der Druckkammer TITAN zur Bestimmung von Toleranzgrenzwerten für Luftdruckschwankungen

Dadurch, dass die im Feld aufgezeichneten physikalischen Druckparameter mit dem Ziel einer direkten Vergleichbarkeit im Labor realitätsgetreu wiedergegeben werden sollten, konnte die Simulationsstudie in der Druckkammer mit der Reproduktion der gemessenen Druckverläufe (Versuchsbedingung B) stets erst nach dem Feldversuch (Versuchsbedingung A) erfolgen. Einem möglichen Reihenfolgeeffekt der globalen Bedingungen „Feldversuch“ und „Laborversuch“ wurde durch Realisierung eines Cross-Over Designs entgegengewirkt. Drei Studiengruppen durchliefen die

Untersuchung in der Abfolge A-B-C, die anderen drei Studiengruppen in der Abfolge C-A-B.

Während der Feldfahrten (Versuchsbedingung A) wurden im Rahmen des Projekts „Next Generation Train“ zusätzlich auch Lärm und Bewegung/Vibration des Zuges aufgezeichnet und in Bezug auf den wahrgenommenen Diskomfort kontinuierlich bewertet. In der Simulationsstudie (Versuchsbedingung B) entfiel eine Bewertung der Bewegung/Vibration aufgrund der fehlenden Möglichkeit einer entsprechenden Simulation in der Druckkammer. Retrospektiv wurden in beiden Versuchsbedingungen zudem Bewertungen von Temperatur und Luftqualität sowie ein Gesamturteil in Bezug auf die physikalischen Umgebungsvariablen erfasst und die Möglichkeit gegeben, weitere relevante Umgebungsvariablen zu benennen und zu bewerten. Die Auswertungen zu den über den Luftdruck hinausgehenden physikalischen Variablen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Dissertation und erfolgen an anderer Stelle im Rahmen des Projekts. Als Teil der für die Dissertation verwendeten Fragebögen sind die betreffenden Items im Anhang mit aufgeführt (siehe Anhang II: Versuchsbedingung A – retrospektiver Fragebogen zur Feldfahrt (Köln-Frankfurt); Anhang III: Versuchsbedingung A – retrospektiver Fragebogen zur Feldfahrt (Frankfurt-Köln); Anhang IV: Versuchsbedingung B – retrospektiver Fragebogen zur Laborfahrt (Simulation Köln-Frankfurt); Anhang V: Versuchsbedingung B – retrospektiver Fragebogen zur Laborfahrt (Simulation Frankfurt-Köln)).

## **4. Operationalisierung des Komfortbegriffs**

In den experimentellen Studien der vorliegenden Dissertation wurde das Ausmaß des jeweils empfundenen Diskomforts erfasst. Dies erfolgte in Übereinstimmung mit der Sichtweise von Branton (1969), Komfort sei lediglich im Sinne der Abwesenheit von Komfort, das heißt im Sinne verschiedener Grade von Diskomfort erfassbar. Die Herangehensweise erschien sinnvoll im Hinblick auf das Ziel, Grenzwerte zu definieren, die den Übergang zu einem nicht mehr tolerierbaren Diskomfort darstellen. Die Messung des Diskomforts als abhängige Variable (AV) erfolgte auf unterschiedliche Weise. Die gewählte Methodik richtete sich nach der Beschaffenheit der zu beurteilenden Druckereignisse. Im Rahmen der Feldstudien (Versuchsbedingung A) sowie der Simulation der Feldfahrten in der Druckkammer

(Versuchsbedingung B) fand eine kontinuierliche Bewertung der rasch aufeinander folgenden Druckereignisse mittels Schieberegler statt. Zudem wurden retrospektive Urteile des globalen Eindrucks am Schieberegler eingestellt sowie ein Fragebogen zur Gesamtbewertung der Fahrt in Bezug auf die erfolgten Luftdruckschwankungen ausgefüllt. Im Falle der Versuchsbedingung C handelte es sich demgegenüber um einzelne, klar voneinander getrennte, generische Drucksprünge, die es zu bewerten galt. Hier kam ein Fragebogen mit siebenstufiger Antwortskala zum Einsatz (siehe Anhang VI: Versuchsbedingung C – Fragebogen zur Bewertung der generischen Drucksprungsprofile). In Abschnitt 4.1 und 4.2 werden die Versuchsbedingungen und die jeweiligen Messmethoden erläutert.

#### **4.1. Versuchsbedingungen A und B: Feldfahrt und Simulation in der Druckkammer**

Um den Einfluss von derzeit auf tretenden Luftdruckschwankungen im Hochgeschwindigkeitsverkehr auf den Passagierkomfort zu untersuchen, wurden Feldversuche im ICE-3 auf der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main durchgeführt. Diese Fahrtstrecke eignet sich aufgrund von zahlreichen Tunneldurchfahrten bei einer Maximalgeschwindigkeit des ICE-3 von 300 km/h besonders gut für diese Studie. Jede Studiengruppe fuhr in Begleitung zweier Untersucher in einem Zweite-Klasse-Abteil. Mithilfe eines hoch auflösenden Drucksensors wurden die zwischen dem Bahnhof Siegburg/Bonn und Frankfurt Flughafen/Fernbahnhof auftretenden Luftdruckschwankungen aufgezeichnet (Hin- und Rückfahrt). Ferner erfolgte die Aufzeichnung der Schalldruckpegel und Bahngeräusche mithilfe eines Klasse 1-Schalldruckpegelmessers sowie eines Audiorecorders zur späteren Wiedergabe im Laborversuch. Zeitgleich zur Aufzeichnung der physikalischen Umgebungsbedingungen gaben die Versuchspersonen während der jeweils 40-minütigen Fahrt ihr Komfortempfinden bezüglich der Luftdruckschwankungen kontinuierlich mithilfe eines Schiebereglers an. Das Verfahren beruht auf der von Kuwano und Namba (1985) entwickelten Methode des „continuous judgment by category“, die ursprünglich entwickelt wurde, um die Geräuschwahrnehmung in ihrem zeitlichen Verlauf zu untersuchen. Diese Methode zur Bewertung von Umweltgeräuschen entspricht dem Ablauf im täglichen Leben und besitzt somit einen hohen Grad an ökologischer Validität. Sie lässt sich auf alle



bedeutungsvollen Geräusche anwenden, wie es etwa bei Musikstücken, Sprache und auch Umweltgeräuschen wie Bahngeräuschen der Fall ist. Im Allgemeinen erlaubt die Methode eine kontinuierliche Bewertung von sich über die Zeit verändernden Umwelteindrücken. Ursprünglich aus der Lärmwirkungsforschung kommend, wurde das „continuous judgment by category“ (Kuwana & Namba, 1985) hier auf die Bewertung von mit der Zeit variierenden Druckverläufen angewandt. Am Ende einer Fahrtstrecke sollten die Versuchspersonen ihren globalen Eindruck am Schieberegler einstellen. Zudem wurde der Gesamteindruck in Bezug auf die Luftdruckschwankungen retrospektiv mittels eines Fragebogens erfasst (siebenstufige Skala von „0 = überhaupt nicht unangenehm“ bis „6 = äußerst unangenehm“).

Die Laboruntersuchungen fanden in der Druckkammer TITAN des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin statt. Hier wurden die vorab im Feld aufgezeichneten Luftdruckschwankungen der jeweiligen Studiengruppe in Echtzeit wiedergegeben und auf die gleiche Weise wie im Feld bewertet (kontinuierliche Bewertung durch den Schieberegler und retrospektive Bewertung der gesamten Druckkammerfahrt mittels Schieberegler und Fragebogen). Die jeweils zugehörigen Bahngeräusche wurden über Lautsprecher in der Druckkammer wiedergegeben. Die Versuchspersonen wurden im Vorhinein nicht informiert, dass es sich um die Reproduktion der Geschehnisse im Feld handelte, um eine Vorbeeinflussung zu vermeiden.

#### **4.2. Versuchsbedingung C: generische Drucksprungprofile in der Druckkammer**

Die Versuchsbedingung C fand ebenfalls in der Druckkammer TITAN statt. Aufgrund des Cross-Over Designs war eine Hälfte der Personen bereits mit dem Aufenthalt in der Druckkammer vertraut, während die andere Hälfte mit dieser Versuchsbedingung begann. Um eine Vorschädigung der Funktion des Mittelohrs bzw. eine dauerhafte Veränderung infolge des Versuchs ausschließen zu können, wurde vor und nach der Laborstudie die Mittelohrfunktion mithilfe einer „Tympanometrie“ untersucht. Diese Methode gibt Aufschluss über das Vorhandensein von Flüssigkeit im Mittelohr, die Beweglichkeit des Mittelohrsystems sowie das Volumen des Hörkanals (Onusko, 2004).

In der Druckkammer wurden den Versuchspersonen generische Drucksprünge dargeboten. Es wurden 30 Drucksprünge ausgewählt, deren Amplituden zwischen 1 und 100 mbar und deren Zeitdauern zwischen 1 und 100 s lagen. Die Druckänderungsrate (Druckänderung in mbar/s) variierte zwischen 0.2 mbar/s und 12.5 mbar/s. Die Druckereignisse überschritten in ihrem Ausmaß die bisher im realen Bahnbetrieb auftretenden Druckschwankungen und sollten eine Abschätzung ermöglichen, bis zu welchem Ausmaß zukünftig zu erwartende Drucksprünge seitens der Bahnkunden toleriert werden. Um ein möglichst realitätsgetreues Abbild des tatsächlichen Bahnfahrens zu erreichen, wurden auch hier während des Versuchs entsprechende Hintergrundgeräusche eingespielt. Für das Versuchsdesign erschien es von besonderer Bedeutung, jeder Studiengruppe eine möglichst zufällige Abfolge der Drucksprünge darzubieten, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Dies geschah durch Randomisierung der Bewertungsblöcke, bestehend aus je zehn Drucksprüngen, sowie einer zusätzlichen Randomisierung der zehn Drucksprünge innerhalb eines Bewertungsblocks für jede Studiengruppe. Zwischen den einzelnen Drucksprüngen wurde den Probanden eine festgelegte Zeit (30 s) zum Druckausgleich gegeben. Zwischen den Bewertungsblöcken wurde die Pause auf 60 s erweitert, da zusätzlich eine globale Einschätzung des Blocks vorgenommen werden sollte. Aufgrund der Diskontinuität der Druckereignisse eignete sich eine Bewertung des empfundenen Grades an Diskomfort am Fragebogen. Ebenso wie im Rahmen der Gesamtbewertung der Fahrten in den Versuchsbedingungen A und B kam auch hier eine siebenstufige Ratingskala zum Einsatz (von „0 = überhaupt nicht unangenehm“ bis „6 = äußerst unangenehm“). War ein Druckereignis aus Sicht des Probanden gar nicht spürbar, sollte die Kategorie „0 = überhaupt nicht unangenehm“ gewählt werden.

## **5. Überblick über die Originalarbeiten**

In Teil B der vorliegenden Arbeit sind die Originalarbeiten zu finden, die bei „Applied Ergonomics“, einem im Social Science Citation Index gelisteten Journal eingereicht und veröffentlicht wurden. Bei Artikel I handelt es sich um ein Multiple-Study-Paper, das sich aus den fragebogenbasierten Studien der Dissertation zusammensetzt. Zunächst wird in Studie 1 auf die Fragebogenstudie am Bahnsteig eingegangen und ein aktueller Status zur Relevanz verschiedener physikalischer

Umgebungsvariablen in der Bahn für den Komfort und das Wohlbefinden der Bahnreisenden dargestellt. Studie 2 behandelt die experimentellen Studien zu den generischen Drucksprüngen in der Druckkammer (Versuchsbedingung C). Die Bewertungen wurden ebenfalls anhand eines Fragebogens erfasst. In Artikel II wird ein Vergleich zwischen den schiebereglerbasierten Feldfahrten und den entsprechenden Simulationen in der Druckkammer gezogen (Versuchsbedingungen A und B). Nachfolgend werden die Inhalte der Originalarbeiten skizziert und zentrale Ergebnisse dargestellt.

### **5.1. Überblick über Artikel I: „Pressure variations on a train – Where is the threshold to railway passenger discomfort?“**

Im Rahmen der Fragebogenstudie am Bahnsteig (Studie 1) wurden sowohl Personen am ICE-Bahnhof als auch solche an der S-Bahn-Station einbezogen. Es wurde angenommen, dass es sich bei den ICE-Nutzern vielfach um Dienstreisende, aber auch um Berufspendler, bei den S-Bahn-Nutzern mehrheitlich um Berufspendler handeln dürfte. Hauptziel der Befragung war die Erfassung eines aktuellen Rankings physikalischer Umweltvariablen hinsichtlich ihrer Relevanz für Komfort und Wohlbefinden beim Bahnfahren. Bei der Gruppe der Dienstreisenden wurde ein höherer Anspruch an den Komfort in der Bahn im Sinne einer signifikant höheren Relevanzbewertung der physikalischen Umweltvariablen erwartet, da die Dienstreisenden vermutlich eher als die Berufspendler die Fahrtzeit in der Bahn zur Verrichtung konzentrativer beruflicher Tätigkeiten nutzen. Hier sollten insbesondere ein niedriger Geräuschpegel sowie ein ruhiger Sitz und ein größeres Raumangebot für ein konzentriertes Arbeiten und zum Beispiel eine angenehme Bedienung des Notebooks von Bedeutung sein. Die Fragebögen wurden verteilt und ein Rückumschlag zur Rücksendung beigelegt. Insgesamt war die Rücklaufquote der Fragebögen mit 61.8% sehr zufrieden stellend. Das Thema „Komfort in der Bahn“ schien aus Sicht der Bahnkunden äußerst bedeutsam zu sein und ein Ausfüllen des Fragebogens war offenbar mit der Hoffnung auf Änderungen im Bahnbetrieb verbunden. Unvollständige und inkonsistente Fragebögen ( $N = 30$ ) wurden aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Zudem wurden solche Fragebögen nicht verwendet, bei denen eine ungewöhnliche Kombination aus genutztem Zugtyp und Grund der Bahnfahrt vorlag

( $N = 17$ , zum Beispiel Dienstreisende in der S-Bahn). Als auswertbar erwiesen sich die Fragebögen von 112 Berufspendlern in der S-Bahn, 109 Berufspendlern im ICE und 41 Dienstreisenden im ICE. Die Mittelwerte der Einstellungsskizzen zur Bahn als Verkehrsmittel zeigen, dass die ICE-Fahrer (sowohl Berufspendler als auch Dienstreisende) dem Bahnfahren gegenüber signifikant positiver eingestellt sind als die S-Bahn-Fahrer. Dies lässt sich durch das per se höhere Komfortniveau und die im Vergleich zur S-Bahn meist weniger gestörte Umgebung im ICE erklären. Der Komfortfaktor „Luftdruck“ ist von mittlerer Relevanz. Als besonders bedeutsam für den Komfort und das Wohlbefinden in der Bahn erweisen sich räumliche und klimatische Faktoren. Die ICE-Fahrer (Dienstreisende und Berufspendler) unterscheiden sich dabei nicht signifikant in der Relevanzeinstufung einzelner Komfortfaktoren. Die Berufspendler im ICE bewerten die Faktoren „Arbeitsfläche“ und „Temperatur“ als signifikant bedeutsamer als die Berufspendler in der S-Bahn. Für den Komfortfaktor „Arbeitsfläche“ ist dieser Unterschied auch für die Dienstreisenden im ICE gegenüber den Berufspendlern in der S-Bahn signifikant. Hier scheint demnach nicht die Tatsache ausschlaggebend zu sein, ob Personen die Bahn als Pendler oder dienstlich nutzen, sondern vielmehr der Verkehrsmitteltyp (ICE gegenüber S-Bahn) bzw. die Dauer der Fahrtstrecke. Es ist anzunehmen, dass die Fahrt im ICE für den Großteil der Personen von längerer zeitlicher Dauer ist als die Fahrt mit der S-Bahn zur Arbeitsstelle. Nicht nur die Dienstreisenden im ICE, sondern auch die Berufspendler im ICE scheinen die Bahnfahrt produktiv nutzen zu wollen. In der S-Bahn würden die Bahnreisenden die Fahrtzeit allein aufgrund der Kürze der Fahrt vermutlich nicht der Verrichtung konzentrativer Arbeit widmen. Auch die Temperatur hat auf längeren Strecken einen bedeutsameren Einfluss auf das Wohlbefinden. Es kann zum Beispiel zu einem Auskühlen bei Kälte bzw. Kopfschmerz und Transpirieren bei Wärme kommen. Da die Berufspendler im ICE diesen Gegebenheiten jeden Tag auf dem Arbeitsweg ausgesetzt sind, sind sie besonders betroffen. Zudem dürfte die Temperatur in der S-Bahn aufgrund fehlender Klimaanlageanregulation als gegeben angesehen werden, während im ICE eine unangemessene Klimaanlageanregulation zu Diskomfortempfinden auf Seiten der Bahnkunden führen kann.

Zudem ergaben sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Aktivitäten während der Bahnfahrt. „Arbeiten“, „Schlafen“, „Schreiben“ und „Essen und Trinken“ sind signifikant häufigere Aktivitäten unter den ICE-Fahrern. Demgegenüber verbringen

die S-Bahn-Fahrer ihre Zeit in der Bahn signifikant häufiger mit „aus dem Fenster sehen“ und „Tagträumen“. Hier zeigt sich, dass die Zeit im ICE von den Berufspendlern tatsächlich genutzt wird: entweder zu produktivem Arbeiten, zur Erholung und Kräftesammlung oder zur Einnahme von Mahlzeiten. Verglichen damit wird die Zeit in der S-Bahn eher überbrückt statt tatsächlich genutzt. Ein weiterer, weniger eingängiger signifikanter Unterschied ergibt sich zwischen den ICE-Fahrern. Die Dienstreisenden gehen der Aktivität „im Gang laufen“ signifikant häufiger nach als die Berufspendler. Da die Berufspendler es gewohnt sind, den ICE jeden Tag zu nutzen, verbringen sie ihre Fahrt zum Arbeitsplatz vermutlich zumeist ruhig und routiniert. Die Dienstreisenden hingegen nutzen womöglich eher das Bord-Bistro, schauen nach Tageszeitungen oder Ähnliches.

Allgemein ist festzuhalten, dass die ursprüngliche Hypothese der höheren Relevanzbewertung von Komfortfaktoren wie „Arbeitsfläche“, „Lärm“ und „Vibrationen/Zugbewegungen“ von Seiten der Dienstreisenden gegenüber Berufspendlern sich nicht in der ursprünglichen Form bestätigen lässt. Vielmehr scheint die Art des Verkehrsmittels (ICE) bzw. die längere Fahrzeit als wichtiger Einflussfaktor zu fungieren. Der Nutzertyp stellt hier nicht den ausschlaggebenden Faktor dar. An den ICE scheint per se ein höherer Komfortanspruch gestellt zu werden und eine längere Fahrt will von den Passagieren produktiv bzw. aktiv genutzt werden. Dies gilt für Dienstreisende und Berufspendler gleichermaßen. Zu beachten ist der Umstand, dass bei den Befragten keine präzise Zuordnung zu bestimmten Verkehrsmitteln möglich war. In zukünftigen Studien sollte neben der Häufigkeit von Fahrten als bestimmter Nutzertyp (Berufspendler, Dienstreisender, Privatfahrer) auch die Häufigkeit der Wahl eines bestimmten Verkehrsmitteltyps (ICE, S-Bahn...) erfasst werden, um noch präzisere Kategorisierungen nach Nutzertyp und Art des genutzten Verkehrsmittels vornehmen zu können.

Nicht in der Originalarbeit enthalten sind neben den Angaben der Befragten zur Berufsausbildung, dem derzeitigen Beruf und der Buchung der ersten oder zweiten Klasse die Ergebnisse der offenen Fragen des Priorisierungsfragebogens, die im Folgenden in aller Kürze skizziert werden. Im Rahmen der Frage nach weiteren komfortrelevanten Faktoren in der Bahn zeigt sich sowohl bei den ICE-Fahrern als auch bei den S-Bahn-Fahrern, dass für den Reisekomfort nicht nur der Fahrkomfort, das heißt der Aufenthalt im Fahrzeug selbst eine wichtige Rolle spielt, sondern auch der lokale

und organisationale Komfort von großer Bedeutung sind (vgl. Mayr, 1959). Komfort beginnt bei der Pünktlichkeit der Bahn und der Sauberkeit, auch am Bahnsteig. Zudem werden Freundlichkeit und Kompetenz des Personals, Zuverlässigkeit der Durchsagen und Informationen zu Reiseverbindungen als wichtige Faktoren genannt, die zum Komfort und Wohlbefinden beitragen. Im Zug selbst wird vorwiegend der zu geringe Stauraum beanstandet. Zudem wird deutlich, dass viele der Befragten sich über die Rücksichtslosigkeit anderer Mitreisender ärgern, vor allem bezogen auf eine lautstarke Nutzung des Mobiltelefons. Auch eine Frage nach weiteren durchgeführten Aktivitäten bot Gelegenheit für Ergänzungen durch die Befragten. Die ICE-Fahrer gaben hier noch einmal in differenzierter Form Tätigkeiten an, die das Ergebnis unterstützen, dass die Fahrtzeit produktiv genutzt wird („E-Mails bearbeiten“, „lernen“, „organisieren“, „diktieren“). Berufspendler im ICE und Berufspendler in der S-Bahn ergänzten zudem die Nutzung des Mobiltelefons. Genau diese Tätigkeit führt umgekehrt zu großem Unmut bei vielen der Befragten, wenn sie durch Mitreisende ausgeübt wird.

In Studie 2 wurden systematische Druckänderungskombinationen in der Druckkammer getestet. Hauptziel war es, den Einfluss einzelner Attribute von Druckereignissen auf den Diskomfort zu ermitteln sowie Grenzwerte zum Diskomfort zu spezifizieren. Zur Bewertung der einzelnen Druckereignisse wurde ein Fragebogen mit einer siebenstufigen Ratingskala von „0 = überhaupt nicht unangenehm“ bis „6 = äußerst unangenehm“ eingesetzt. Aus den mittleren Bewertungen wird ersichtlich, dass ein Druckanstieg offenbar als unangenehmer empfunden wird als ein Druckabfall. Zudem werden Druckänderungen, die sich durch eine höhere Amplitude und eine längere Einwirkdauer auszeichnen, als unangenehmer empfunden als Druckänderungen derselben Druckänderungsrate, die mit niedrigerer Amplitude und in kürzerer Zeit erfolgen. Mithilfe eines gemischten linearen Modells mit Zufallseffekten wurden Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen Druckänderungsparametern und den dazugehörigen Diskomfortbewertungen untersucht. Das Modell beinhaltet „Druckamplitude“ (Betrag), „Zeitdauer der Druckänderung“, „Druckänderungsrate“ (Betrag) sowie „Vorzeichen der Druckänderung“ als statistisch signifikante Einflussvariablen. Darüber hinaus geht eine signifikante Interaktion erster Ordnung zwischen Druckamplitude und Vorzeichen der Druckänderung in das Modell ein. Handelt es sich um einen Druckanstieg, ist der Diskomfort umso höher gegenüber einem Druckabfall, je höher die Amplitude ist. Zudem hat die Bewertung des jeweils vorangegangenen

Drucksprungs einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der aktuellen Druckänderung. Bis auf den Prädiktor „Zeitdauer der Druckänderung“ geht ein höherer Wert der Prädiktorvariablen mit einer höheren Bewertung auf der Antwortskala und demnach einer stärker unkomfortablen Bewertung der Druckänderung einher. Das negative Vorzeichen des Parameters „Zeitdauer der Druckänderung“ weist darauf hin, dass eine Druckänderung, die sich über einen längeren Zeitraum aufbaut, eine niedrigere und somit komfortablere Bewertung auf der Antwortskala zur Folge hat.

Zudem wurde ein logistisches Modell mit Zufallseffekten berechnet, das Vorhersagen zum Prozentsatz jener Personen erlaubt, die eine bestimmte Druckänderung als unkomfortabel empfinden. Zur Berechnung des Modells wurde die abhängige Variable „Bewertung der Druckänderung“ mittels Dummy-Kodierung in eine dichotome Variable transformiert. Basierend auf der Skalenbenennung wurden die Kategorien 0 („überhaupt nicht unangenehm“) bis 3 („mittelmäßig unangenehm“) der siebenstufigen Skala zur Kategorie „komfortabel“ zusammengefasst. Die Kategorien 4 („ziemlich unangenehm“) bis 6 („äußerst unangenehm“) bildeten die Kategorie „unkomfortabel“. Um eine direkte Vergleichbarkeit zum linearen gemischten Modell zu ermöglichen, wurden dieselben Variablen in den Modellierungsprozess eingeschlossen. Der psychologische Parameter „Bewertung der vorangegangenen Druckänderung“ erreichte nur marginale Signifikanz. Die physikalischen Parameter zeigen alle einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable. Alter und Geschlecht als soziodemographische Variablen, die Einstellung gegenüber dem Bahnfahren (Item „Ich fahre sehr gerne mit der Bahn“) sowie die Relevanzeinstufung des Luftdrucks für Komfort und Wohlbefinden in der Bahn wurden als mögliche Moderatorvariablen getestet. Die Analyse erbrachte keinen signifikanten Einfluss. Zieht man die Ergebnisse der Regressionsanalysen heran, um Bewertungen für die bestehenden UIC-Druckkomfortrichtlinien vorherzusagen, so liegen alle vorhergesagten Werte im noch komfortablen Bereich unterhalb der Grenze zum Diskomfort. Die Definition der Grenze basiert auf der Benennung der Skalenstufen. Andere Grenzwerte sind ebenfalls denkbar. Um nicht nur tolerierbare, sondern komfortable Bedingungen im Zug zu schaffen, könnte der Grenzwert auch auf den Wert „2 = wenig unangenehm“ gesetzt werden. Dies würde zu Empfehlungen geringerer Amplituden innerhalb definierter Zeitdauern führen. Bei einem Grenzwert oberhalb von „2 = wenig unangenehm“ würde

die von der UIC vorgegebene Richtlinie von  $\leq 5$  mbar innerhalb von 1 s die Grenze überschreiten.

Allgemein ist zu bedenken, dass alle Probanden, die an der Laborstudie teilnahmen, gesund waren. Der Druckausgleich dürfte zum Beispiel für solche Personen schwerer sein, die unter Ohrinfektionen oder allgemeinen Erkältungskrankheiten leiden, sowie für Ältere oder Kinder. Um Komfortkriterien für Gruppen unterschiedlicher Sensibilität gegenüber Luftdruckschwankungen zu spezifizieren, müsste eine größere, geschichtete Stichprobe einer Analyse unterzogen werden. Zudem wurde den Probanden zwischen den Präsentationen der einzelnen Druckereignisse Zeit gegeben, den Druck vor Eintreten des nachfolgenden Druckereignisses auszugleichen. Eine Kette von Druckereignissen, wie sie im Laufe einer realen Bahnfahrt auftritt, bietet zumeist weit weniger Zeit zum Druckausgleich. In der Konsequenz ist zu vermuten, dass die Bewertungen im Rahmen einer realen Bahnfahrt aufgrund möglicher kumulativer Effekte der Druckereignisse schlechter ausgefallen wären. Weiterhin zu beachten ist die Tatsache, dass die Probanden sich stark auf die Bewertung der Druckänderungen konzentriert haben. Während einer tatsächlichen Bahnfahrt sind viele weitere Faktoren zugegen, die die Wahrnehmung der Druckereignisse bzw. ihre Wirkung auf das Komfortempfinden moderieren, das heißt abschwächen oder verstärken können. Untersuchungen im realen Bahnbetrieb sind sinnvoll, um die externe Validität der Studien zu gewährleisten. Sodann ist es möglich, einen Vergleich der Ergebnisse zu systematischeren und besser kontrollierbaren Laborexperimenten zu ziehen.

## **5.2. Überblick über Artikel II: „Continuous assessments of pressure comfort on a train – A field-laboratory comparison”**

Im zweiten Artikel werden die Ergebnisse der Feldfahrten im ICE-3 und die der Simulationen der Fahrten in der Druckkammer dargestellt. Zum einen geht es hier um das Erfassen eines Status quo, um Einblicke in das Druckkomfortniveau im derzeitigen Bahnbetrieb zu erhalten. Der „Next Generation Train“ setzt sich zum Ziel, in Bezug auf den Passagier- bzw. den Druckkomfort eine Verbesserung zur aktuellen Situation zu gewährleisten. Zudem werden sich aufgrund neuer Tunnelrichtlinien Veränderungen bzw. Verminderungen im Druckkomfort ergeben. Es erscheint demnach sinnvoll, im Vorfeld abzuschätzen, inwiefern Einbußen im Druckkomfort von den



Passagieren noch toleriert werden würden. Zum anderen wurde untersucht, ob die Komfortbewertungen während einer realen Bahnfahrt und in der Druckkammer des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Die Druckereignisse auf der Fahrtstrecke Siegburg-Frankfurt bzw. Frankfurt-Siegburg wurden für jede Studiengruppe aufgezeichnet. Aufgrund unterschiedlicher Dichtigkeiten der Züge und divergierender Fahrgeschwindigkeiten traten zwischen den Realfahrten Variationen in den Druckprofilen auf. Aus diesem Grund musste für eine direkte Vergleichbarkeit stets der Feldversuch vor dem Laborversuch der jeweiligen Gruppe erfolgen, um das entsprechend aufgezeichnete Druckprofil der Studiengruppe realitätsgetreu in der Druckkammer wiedergeben zu können. Die Bewertungen wurden in beiden Fällen unter Einsatz der Schiebereglermethode zur kontinuierlichen Erfassung des Diskomforts vorgenommen. Im Gegensatz zum Einsatz eines Fragebogens zu definierten Zeitpunkten ermöglicht diese Methode eine Erfassung und Bewertung jedes einzelnen Ereignisses. Darüber hinaus können Hinweise zum Gesamteffekt der Einzelereignisse durch eine globale Bewertung am Schieberegler und am Fragebogen gewonnen werden. Die kontinuierlichen Bewertungen wurden als digitale Werte zwischen der untersten Einstellung „0“ (kein Diskomfort) und der höchsten Einstellung „100“ (maximaler Diskomfort) gespeichert. Die Aufzeichnungen des Druckverlaufs sowie der entsprechenden Schiebereglerstellungen hatten eine Länge von etwa 80 Minuten (etwa 40 Minuten pro Hin- und Rückfahrt) pro Studiengruppe und Versuchsbedingung. Zunächst wurde nach festgelegten Kriterien eine Filterung der Rohdaten nach merklichen Druckereignissen vorgenommen. Sodann erfolgte eine Zuordnung der als merklich definierten Druckereignisse zu den Schiebereglerstellungen der Probanden. Die mittleren Schiebereglerstellungen im Feld ( $M = 17.1\%$ ,  $SD = 22.0$ ) und im Labor ( $M = 16.8\%$ ,  $SD = 19.5$ ) deuten zum einen auf ein eher moderates Diskomfortempfinden der Probanden im heutigen Bahnbetrieb hin. Zum anderen zeigen die Ergebnisse, dass sich Feld- und Laborbewertungen nicht bedeutsam voneinander unterscheiden. Dies untermauert auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test, der keine signifikanten Differenzen zwischen den Versuchsbedingungen offen legt. Auch die retrospektiven Bewertungen am Schieberegler liegen mit einem Mittelwert von 20.7% ( $SD = 19.3$ ) im Feld und 20.8% ( $SD = 18.7$ ) im Labor im moderaten Bereich und unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die mittleren Fragebogenbewertungen (siebenstufige Skala von „0 = überhaupt nicht unangenehm“ bis „6 = äußerst

unangenehm“) befinden sich mit 2.3 ( $SD = 1.0$ ) im Feld und 2.4 ( $SD = 1.0$ ) im Labor ebenfalls in einem als moderat zu bezeichnenden Bereich und sind nicht signifikant voneinander verschieden.

Durch die Berechnung einer verallgemeinerten Schätzgleichung (generalized estimating equation model, GEE) wurde der Einfluss der einzelnen Druckänderungsparameter auf die Bewertung des Druckkomforts in Feld und Labor analysiert (Zeger & Liang, 1986). Höhere Druckamplituden (Betrag), eine kürzere Zeitdauer, in der eine Druckänderung erfolgt, sowie höhere Druckänderungsraten (Betrag) tragen zu signifikant höheren Schiebereglerstellungen, das heißt zu einem signifikant höheren Diskomfort bei. Zudem zeigen Druckabfälle gegenüber Druckanstiegen einen signifikanten Einfluss im Sinne einer höheren Diskomfortbewertung. Eine Interaktion zwischen Druckänderungsrate und Vorzeichen führt ab einer Druckänderungsrate von etwa 1.3 mbar/s dazu, dass Druckanstiege gegenüber Druckabfällen als signifikant unangenehmer bewertet werden. Um mögliche Effekte der unmittelbar vorausgehenden Ereignisse mit zu berücksichtigen, wurden zudem die Druckänderungsrate sowie das Vorzeichen des jeweils unmittelbar vorausgegangenen Druckereignisses mit in das Modell aufgenommen und der Einfluss auf die aktuelle Diskomfortbewertung analysiert. Der Grad des Einflusses der Druckänderungsrate des vorausgegangenen Druckereignisses auf die Bewertung des aktuellen Ereignisses wurde mithilfe einer Abklingfunktion zeitlich korrigiert. Die Analyse zeigte, dass bei gleichem Vorzeichen zweier aufeinander folgender Druckereignisse die Bewertung signifikant schlechter ausfällt als bei Ereignissen mit unterschiedlichen Vorzeichen. Ist kein merkliches Druckereignis unmittelbar vorangegangen, so fällt die Bewertung eines aktuellen Druckereignisses am positivsten aus.

Das experimentelle Setting erwies sich als nicht signifikant und ging daher nicht in die verallgemeinerte Schätzgleichung ein. Dieses Ergebnis stützt die ökologische Validität der Druckkammer TITAN des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin. Zum einen bieten Laborstudien den Vorteil, weniger kostspielig, weniger zeitintensiv und besser kontrollierbar zu sein als Feldexperimente. Zudem eröffnet sich hierdurch die Möglichkeit, zukünftige Szenarien zu untersuchen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt noch nicht im realen Bahnbetrieb auftreten.

Die Methode der Schieberegler bietet sich als Messmethode immer dann besonders an, wenn es sich um einen kontinuierlichen Druckverlauf handelt, den es zu bewerten gilt. Der Fragebogen zeigt zwar vergleichbare Ergebnisse verglichen mit der retrospektiven Bewertung am Schieberegler, lässt jedoch keine Aussagen zum Einfluss einzelner Druckereignisse auf den globalen Eindruck zu. Beim Einsatz der Schieberegler ist allerdings zu bedenken, dass es sich dabei um eine höchst konzentrierte Aufgabe handelt, eine kontinuierliche Introspektion des eigenen Druckgefühls auf den Ohren bzw. des damit einhergehenden Diskomforts vorzunehmen. Effekte wie mentale Ermüdung oder Motivationsverlust lassen sich – besonders zum Ende einer Strecke hin – nicht ausschließen.

## **6. Zusammenfassende Diskussion**

Das Ausmaß von Luftdruckschwankungen im Zuginneren sieht derzeit einigen Veränderungen entgegen. Diese sind bedingt durch den Erlass einer neuen Tunnelrichtlinie des Eisenbahnbundesamtes (2008), welche zum Bau eingleisiger Tunnel und damit zur Absenkung des bisherigen Druckkomfortniveaus für Bahnreisende führt. Die beschriebenen Studien im Rahmen der vorliegenden Dissertation dienen dazu, einen Status quo der Druckkomfortsituation für Bahnreisende zu erheben und mögliche Auswirkungen des Wandels in der schienenverkehrbezogenen Infrastruktur auf den Passagierkomfort frühzeitig zu überblicken.

Die Bahnsteigbefragung liefert einen deskriptiven Beitrag zur Erfassung der derzeitigen Relevanzeinschätzung des Komfortfaktors „Luftdruck“ an einer größeren Stichprobe. Hierbei wurde zudem der Versuch unternommen, verschiedene Kundengruppen zu erfassen und die Situation differenziert nach Interessenlage des Bahnkunden zu betrachten. Die Befragung offenbart eine höhere Relevanzeinschätzung klimatischer und räumlicher Komfortaspekte (zum Beispiel Luftqualität, Temperatur, Beinfreiheit, Sitz) gegenüber dem Luftdruck. Eine angenehme Temperatur im Wagen sowie ein ausreichendes Raumangebot überwiegen im Bewusstsein der Bahnreisenden als bedeutsame Bedingungen für eine komfortable Bahnfahrt. Dieses Ergebnis deckt sich weitgehend mit den Ergebnissen der Studien zum Passagierkomfort im Flugzeug, an die der vorliegende Priorisierungsfragebogen angelehnt ist (Jacobson & Martinez, 1974; Richards & Jacobson, 1975).

Im jetzigen Betrieb scheinen die aerodynamischen Effekte, die das Ohr des Passagiers erreichen, tolerierbar zu sein. Die Ergebnisse der Feld- und Laborstudien (Abschnitt 4.1, Versuchsbedingungen A und B) unterstreichen dieses Ergebnis. Hier wurden 31 Probanden im Rahmen eines Messwiederholungsdesigns unter insgesamt drei Versuchsbedingungen untersucht. Die mittleren Bewertungen am Schieberegler bewegen sich im unteren Viertel des maximal einstellbaren Diskomforts. Auch die Fragebogenbewertungen am Ende der Fahrtstrecken liegen im Mittel zwischen den Bewertungen „2 = wenig unangenehm“ und „3 = mittelmäßig unangenehm“. Der Feld-Labor-Vergleich ergibt eine hohe Übereinstimmung der Bewertungen von Luftdruckschwankungen in Feld und Labor. Zum einen stützt dieses Ergebnis die ökologische Validität der Druckkammer im Allgemeinen. Im Speziellen liefert es Hinweise in Bezug auf die Validität der Untersuchungsergebnisse der generischen Drucksprungprofile (Abschnitt 4.2, Versuchsbedingung C). Die generischen Profile übersteigen in ihrem Ausmaß die im aktuellen Bahnbetrieb auftretenden Luftdruckschwankungen. Eine Untersuchung im Feld war demnach nicht umsetzbar. Die Tatsache, dass die Ergebnisse der realen Fahrten (Versuchsbedingung A) sich im Labor im Rahmen einer Simulationsstudie reproduzieren ließen (Versuchsbedingung B), deutet darauf hin, dass sich in der Druckkammer TITAN gewonnene Ergebnisse nicht signifikant von denen unterscheiden, die sich in einer realen Bahnumgebung gewinnen lassen. Die systematisch untersuchten generischen Drucksprungprofile liefern Bewertungen des von den Probanden empfundenen Diskomforts für eine große Bandbreite an Druckamplituden und Zeitdauern, über die sich ein Druckereignis aufbaut. In der realen Feldfahrt und der Reproduktion in der Druckkammer (Versuchsbedingungen A und B) traten keine Druckereignisse in einer Größenordnung auf, die aufgrund der Kenntnisse aus Versuchsbedingung C als isolierte Luftdruckschwankungen die Toleranzgrenze überschritten hätten. Natürlich ist zu bedenken, dass die in Versuchsbedingung C untersuchten Ereignisse keine Kette von Ereignissen darstellten und zudem die Methodik des Fragebogens statt des Schiebereglers zum Einsatz kam. Insofern ist ein solcher Transfer nur bedingt zulässig. Dennoch ist auch dies als Bestätigung dafür zu sehen, dass derzeitige Reisebedingungen in Bezug auf den Druckkomfort mehrheitlich tolerabel erscheinen. Diese Aussage ist lediglich generalisierbar in Bezug auf solche Personen, die keinerlei Probleme mit dem

Druckausgleich haben. Unter Einbezug sensibler Gruppen ist durchaus mit schlechteren Bewertungen des Druckkomfortniveaus im aktuellen Bahnbetrieb zu rechnen.

Die Untersuchungen zu den generischen Drucksprungprofilen (Versuchsbedingung C) zeigen jedoch deutlich, dass bei höheren Amplituden und kürzeren Zeitdauern bzw. bei höheren Druckänderungsraten auch bei gesunden Passagieren mit einer schlechten Bewertung des Druckkomforts zu rechnen ist. Es erscheint also durchaus bedeutsam zu sein, mögliche Auswirkungen des Anstiegs der auf die Bahnreisenden wirkenden Luftdruckschwankungen im Vorfeld abzuschätzen. Die Wirkung von stärker ausgeprägten Luftdruckschwankungen auf den Passagierkomfort wird noch dadurch verschärft, dass sich die Luftdruckschwankungen während einer realen Fahrt in einer schnellen zeitlichen Aufeinanderfolge ereignen. Erste Hinweise zu kumulativen Effekten konnten im Rahmen der verallgemeinerten Schätzgleichung zur Analyse der kontinuierlichen Bewertung der Druckereignisse in Feld und Labor (Versuchsbedingungen A und B) bereits gewonnen werden. Hier wurden die jeweils vorangegangenen Druckereignisse berücksichtigt und ihr Einfluss auf die Bewertung des nachfolgenden Ereignisses analysiert.

In einem systematischen Laborexperiment könnte zukünftig untersucht werden, wie genau die Einflussnahme eines Druckereignisses auf ein darauf folgendes, insbesondere auch zeitlich gesehen, beschaffen ist. Durch systematische Variation der zeitlichen Abstände zwischen verschiedenen Ereignissen wäre dies überprüfbar. Ein derartiges Versuchsdesign würde weitere Einblicke hinsichtlich jener Bedingungen liefern, unter denen sich Effekte mehrerer Druckereignisse akkumulieren und den Passagierkomfort beeinträchtigen.

## 7. Literatur

- Bopp, R., & Hagenah, B. (2009). Aerodynamics, ventilation and tunnel safety for high speed rail tunnels. *Paper presented at the Workshop "Tunnels for high-speed railways" at the Faculty of Engineering of the University of Porto*, 1-2 October, Porto, Portugal. Retrieved from [http://www.gruner-gmbh.at/aktuelles\\_gmbh\\_at/pdf\\_pool/D\\_HAB\\_Porto.pdf](http://www.gruner-gmbh.at/aktuelles_gmbh_at/pdf_pool/D_HAB_Porto.pdf)
- Branton, P. (1969). Behaviour, body mechanics and discomfort. *Ergonomics*, 12, 316-327.
- Brundrett, G. (2001). Comfort and health in commercial aircraft: a literature review. *The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, 121, 29-37.
- Christiansen, K. (1997). Subjective assessment of sitting comfort. *Collegium Antropologicum*, 21, 387-395.
- Ebe, K., & Griffin, M.J. (2000). Qualitative models of seat discomfort including static and dynamic factors. *Ergonomics*, 43, 771-790.
- Eisenbahnbundesamt [Federal Railway Authority] (2008). *Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln [Requirements for fire and civil protection in the construction and operation of railway tunnels]*. Zugriff am 22. Februar 2011 auf [http://www.eba.bund.de/cln\\_031/SharedDocs/Publikationen/DE/Infothek/Infrastruktur/Tunnelbau/21\\_\\_rl\\_\\_tunnelbau,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/21\\_\\_rl\\_\\_tunnelbau.pdf](http://www.eba.bund.de/cln_031/SharedDocs/Publikationen/DE/Infothek/Infrastruktur/Tunnelbau/21__rl__tunnelbau,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/21__rl__tunnelbau.pdf)
- Förstberg, J., Andersson, E., & Ledin, T. (1998). Influence of different conditions for tilt compensation on symptoms of motion sickness in tilting trains. *Brain Research Bulletin*, 47, 525-535.

- Gawthorpe, R.G. (2000). Pressure effects in railway tunnels. *Rail International*, 31, 10-17.
- Gawthorpe, R.G., Glöckle, H., & Stroud, P. (1988). Predicted Passenger Response to Rail Tunnel Pressure Transients. In: P. Wood & R. Pickford (Eds.), *Paper presented at the 6<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 27-29 September, Durham, UK (pp. 45-60). Cranfield, Bedford, England: BHRA.
- Glöckle, H., & Pfretzschner, P. (1988). High speed tests with ICE/V passing through tunnels, and the effects of sealed coaches on passenger comfort. In: P. Wood & R. Pickford (Eds.), *Paper presented at the 6<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 27-29 September, Durham, UK (pp. 23-44). Cranfield, Bedford, England: BHRA.
- Hagenah, B., Reinke, P., & Vardy, A.E. (2006). Effectiveness of pressure relief shafts – full scale assessment. In: A.E. Vardy (Ed.), *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 11-13 July, Portoroz, Slovenia (pp. 379-391). Cranfield, Bedford, England: BHR Group.
- Han, S.H., Jung, E.S., Jung, M., Kwahk, J., & Park, S. (1998). Psychophysical methods and passenger preferences of interior designs. *Applied Ergonomics*, 29, 499-506.
- Hardy, A.E.J. (1999). Railway passengers and noise. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 213, 173-180.
- Hardy, A.E.J. (2000). Measurement and assessment of noise within passenger trains. *Journal of Sound and Vibration*, 231, 819-829.
- Helander, M.G., & Zhang, L. (1997). Field studies of comfort and discomfort in sitting. *Ergonomics*, 40, 895-915.

- Hertzberg, H.T.E. (1972). The human buttock in sitting: pressures, patterns, and palliatives. *American Automobile Transactions*, 72, 39-47.
- Jacobson, I.D., & Martinez, J. (1974). The comfort and satisfaction of air travelers: basis for a descriptive model. *Human Factors*, 16, 46-55.
- Johnson, T., Prevezer, T., & Figura-Hardy, G.I. (2000). Tunnel pressure comfort limits examined using passenger comfort ratings. In: A.S. Caserta (Ed.), *10<sup>th</sup> International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels: Principles, Analysis, and Design*, 1-3 November, Boston, USA (pp. 221-239). Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publishing.
- Jung, E.S., Han, S.H, Jung, M., & Choe, J. (1998). Coach design for the Korean high-speed train: a systematic approach to passenger seat design and layout. *Applied Ergonomics*, 29, 507-519.
- Kim, S.-H., Moon, Y.-O., Seok, J.-H., & Kim, K.-L. (2008). A study on tunnel cross-section design with particular consideration of aerodynamic characteristics for the Honam H.S.R. In: V.K. Kanjlia, T. Ramamurthy, P.P. Wahi & A.C. Gupta (Eds.), *Proceedings of the World Tunnel Congress*, 22-24 September, Agra, India (pp. 577-586). New Delhi: Central Board of Irrigation.
- Krist, R. (1994). *Modellierung des Sitzkomforts. Eine experimentelle Studie*. Weiden: Schuch.
- Kuwano, S., & Namba, S. (1985). Continuous judgment of level-fluctuating sounds and the relationship between overall loudness and instantaneous loudness. *Psychological Research*, 47, 27-37.
- Kuwano, S., Namba, S., & Okamoto, T. (2004). Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 277, 491-500.



- Létourneaux, F., Guerrand, S., & Poisson, F. (2000). Assessment of the acoustical comfort in high-speed trains at the SNCF: Integration of subjective parameters. *Journal of Sound and Vibration*, 231, 839-846.
- Lee, Y., Shin, K., Lee, S., Song, Y., Han, S., & Lee, M. (2009). Ride comfort analysis with physiological parameters for an e-health train. *Telemedicine Journal and e-health*, 15, 1010-1021.
- Mayr, R. (1959). Comfort in railway travel. *Railway Gazette*, 912, 266-269.
- McClelland, I.L., & Gawthorpe, R.G. (1986). The response of railway passengers to pressure fluctuations. *Applied Ergonomics*, 17, 305-315.
- Oborne, D.J. (1978a). Passenger comfort – an overview. *Applied Ergonomics*, 9, 131-136.
- Oborne, D.J. (1978b). Techniques available for the assessment of passenger comfort. *Applied Ergonomics*, 9, 45-49.
- Oborne, D.J., & Clarke, M.J. (1973). The development of questionnaire surveys for the investigation of passenger comfort. *Ergonomics*, 16, 855-869.
- Onusko, E. (2004). Tympanometry. *American Family Physician*, 70, 1713-1720.
- Park, B., Lee, S., Choi, S., & Park, J. (2011). Sound quality characteristics for transient noise of high speed railway interior. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130, 2565.
- Patsouras, C., Fastl, H., Widmann, U., & Hölzl, G. (2000). Privacy versus sound quality in high speed trains. In: D. Cassereau (Ed.), *Proceedings of the inter-noise*, 27-30 August, Nice, France (pp. 391-396). Paris: SFA.
- Patsouras, C., Fastl, H., Widmann, U., & Hölzl, G. (2002). Psychoacoustic evaluation of tonal components in view of sound quality design for high speed train interior noise. *Acoustical Science and Technology*, 23, 113-116.

- Richards, L.G. (1980). On the psychology of passenger comfort. In: D.J. Osborne & J.A. Levis (Eds.), *Human factors in transport research* (pp. 15-23). London: Academic Press.
- Richards, L.G., & Jacobson, I.D. (1975). Ride quality evaluation 1. Questionnaire studies of airline passenger comfort. *Ergonomics*, 18, 129-150.
- Richards, L.G., & Jacobson (1977). Ride quality assessment III. Questionnaire results of a second flight programme. *Ergonomics*, 20, 499-519.
- Richards, L.G., Jacobson, I.D., & Kuhlthau, A.R. (1978). What the passenger contributes to passenger comfort. *Applied Ergonomics*, 9, 137-142.
- Shackel, B., Chidsey, K.D., & Shipley, P. (1969). The assessment of chair comfort. *Ergonomics*, 12, 269-306.
- Slater, K. (1985). *Human comfort*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Suzuki, H. (1998a). Research trends on riding comfort evaluation in Japan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 212, 61-72.
- Suzuki, H. (1998b). Momentary discomfort caused by vibration of railway vehicle. *Industrial Health*, 36, 98-106.
- UIC Leaflet 779-11 (2005). *Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations*. Paris: Union Internationale des Chemins de fer.
- Vink, P., & Hallbeck, S. (2012). Editorial: Comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model. *Applied Ergonomics*, 43, 271-276.
- Vernet, M., & Vallet, M. (1977). Noisiness of high speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 51, 359-361.

- Wan-Suk, Y., Chang-Hwan, L., Weui-Bong, J., & Sang-Hyun, K. (2005). Development and application of new evaluation system for ride comfort and vibration on railway vehicles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19, 1469-1477.
- Zeger, S.L., & Liang, K.-Y. (1986). Longitudinal data analysis for discrete and continuous outcomes. *Biometrics*, 42, 121-130.
- Zhang, L., Helander, M.G., & Drury, C.G. (1996). Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors*, 38, 377-389.

## **Teil B: Originalarbeiten**

## **Artikel I: Pressure variations on a train – Where is the threshold to railway passenger discomfort?**

**Sandra Schwanitz<sup>a,\*</sup>, Martin Wittkowski<sup>a</sup>, Vinzent Rolny<sup>a</sup> and Mathias Basner<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>German Aerospace Center (DLR), Institute of Aerospace Medicine, Department of Flight Physiology, Linder Höhe, 51147 Cologne, Germany

<sup>b</sup>University of Pennsylvania, Perelman School of Medicine, Department of Psychiatry, Division of Sleep and Chronobiology, Philadelphia, USA

\* Corresponding author. Tel.: +49 2203 601 3175; fax: +49 2203 68323

E-mail address: [Sandra.Schwanitz@dlr.de](mailto:Sandra.Schwanitz@dlr.de)

**Article in press („Applied Ergonomics“); available online since August 10, 2012**

### ***Abstract***

The implementation of recent guidelines for tunnel construction in Germany leads to extended air pressure variations inside trains and reduces pressure comfort for railway passengers. A questionnaire survey with 262 passengers revealed that pressure variations are rated less important for riding comfort than climatic and spatial aspects (study 1). A laboratory experiment (study 2) in the pressure chamber at the DLR Institute of Aerospace Medicine with 31 subjects (mean age = 37.7,  $SD = 12.7$ ; 51.6% male) investigated the effects of systematic pressure variations on discomfort. The pressure changes (pressure increases and decreases) ranged from 1 to 100 mbar and were realized within 1 to 100 s. We derived thresholds for healthy passengers by means of random effects linear and logistic regression analysis. Logistic dose-response curves revealed amplitude/time combinations leading to a certain percentage of passengers perceiving discomfort (e.g. 50% dissatisfied passengers regarding a pressure increase of approximately 30 mbar within 5 s). The findings may help design engineers to meet passengers' comfort requirements.

### ***Keywords***

Pressure, discomfort, railway passenger

# 1. Introduction

Safety and speed are two very important criteria for choosing a mode of transport. However, travel time is more and more used for work and/or recuperation. Hence, the complex construct of passenger comfort is increasingly relevant for the choice of transport mode (Richards, Jacobson & Kuhlthau, 1978). There is neither a common definition of the concept of comfort nor a generally accepted consensus regarding the relationship of comfort and discomfort. According to Hertzberg (1972) and Branton (1969) comfort can be equated with absence of discomfort. In contrast, Zhang, Helander and Drury (1996) and Helander and Zhang (1997) refer to comfort and discomfort as discontinuous constructs stating that comfort does not automatically appear in the absence of discomfort. There is rather a relation of comfort to factors like relaxation and luxury, experiences that exceed former expectations. According to Vink and Hallbeck (2012), who agree with that assumption of discontinuity, “comfort is seen as pleasant state or relaxed feeling of a human being in reaction to its environment and discomfort is seen as an unpleasant state of the human body in reaction to its physical environment” (p. 271).

The present work focuses on physical aspects of a train environment. There are many environmental conditions contributing to a more or less comfortable railway journey such as noise, vibration, temperature and design of the seat (Suzuki, 1998). According to Richards (1980) they can be described as dynamic factors (e.g. characteristics of vehicle motion), ambient factors (e.g. temperature, humidity) and spatial factors (e.g. legroom, workspace). These physical factors are connected to physiological (such as physical well-being) and psychological comfort aspects (such as mood, motivation). As soon as problems arise in the field of physical comfort the physiological and psychological comfort aspects are influenced in a negative way (Slater, 1985).

A specific field of research concerns the sensation of aural discomfort. The latter can be induced by pressure variations that occur especially while a train passes through a tunnel. Studies concerning pressure variations in tunnels were initiated when the first plans for high-speed trains were made (McClelland and Gawthorpe, 1986). Pressure equalization normally takes place automatically by ventilation of the middle ear in case of pressure decrease and can be actively supported by swallowing or

yawning in case of pressure increase. Compared to a flight, where passengers are confronted with pressure differences of up to 250 mbar, pressure variations of approximately 40 mbar on a train are fairly small (Gawthorpe, 2000). The difference of a railway journey in contrast to a flight in a civil aircraft is the higher speed of pressure changes. In particular on railway lines with many tunnels even passengers without ear diseases (e.g. blocked Eustachian Tubes, ear surgery) do not have enough time for passive or active means of ear clearing.

Additionally, the pressure amplitudes appearing during a railway journey will increase as a result of new guidelines concerning tunnel constructions. In Germany, tunnels with a length of more than 1000 m on high-speed railway lines with combined use of passenger and freight trains have to be constructed as parallel single-track lines with only one tube in each direction. This guideline is incorporated in a document of the Federal Railway Authority (Eisenbahnbundesamt, 2008) providing requirements for fire and civil protection in the construction and operation of railway tunnels. Under these circumstances the cross section of the tunnel will be reduced and therefore the extent of pressure variations affecting the train will increase. For the present rolling stock this will lead to higher pressure variations inside the passenger carriage and consequently to a reduced pressure comfort for train passengers.

There are many potential ways of reducing pressure variations inside a railway carriage, e.g. increasing tunnel cross sections, altering the shape of the tunnel entrance, installation of air shafts in the tunnel, improving the sealing of passenger cars or the application of speed limits (Gawthorpe, 2000).

All these measures are time-consuming and cost-intensive. The investigation of pressure comfort limits of railway passengers should be an essential field of research in order to ensure the competitive potential of this mode of transport compared to others like automobile or civil aircraft. Individual differences in the perception of pressure variations among passengers led to inconsistent definitions and national guidelines. Setting uniform comfort criteria suitable for every single person using the train seems to be a fairly challenging task. Recommendations of different nations have been merged by the International Union of Railways (UIC). The specified criteria define maximum amplitudes of pressure variations in a certain time interval as described in Table 1 (Hagenah, Reinke & Vardy, 2006).

*Table 1: Comfort criteria of UIC regarding pressure variations in railway carriages (Hagenah et al., 2006).*

Time interval	Maximum pressure variation within time interval
1 s	$\leq 5$ mbar
3 s	$\leq 8$ mbar
10 s	$\leq 10$ mbar
60 s	$\leq 20$ mbar

The European Committee for Standardization constituted as a medical limit for pressure variations a maximum change of 100 mbar (between maximum and minimum pressure value) at any time while a train is passing through a tunnel (UIC Leaflet 779-11, 2005).

Research motivation for study 1 was to examine an actual ranking of the relative importance of several environmental comfort aspects on a train based on a sufficiently large sample size. In the past, such a ranking was investigated concerning comfort aspects in a flight environment only (Richards and Jacobson, 1975). We were especially interested in the present ranking of air pressure fluctuations on a train compared to other comfort aspects (e.g. workspace, humidity, and lighting). Furthermore, the study was designed to carry out group comparisons according to general attitudes regarding this mode of transport, the ranking of comfort aspects and the frequency of activities during a railway journey (e.g. reading, working, and sleeping). The groups were formed by different types of passengers (commuters and business travelers) on the one hand and different types of trains used by passengers (city train and high speed long distance train called Intercity-Express (ICE) in Germany) on the other hand. It was expected that business travelers using the ICE regularly spend their time on a train working. Therefore, environmental aspects that assist concentrative



work (e.g. workspace, noise, vibration) should be rated more important compared to ratings by commuters on a city train.

Primary objective of study 2 was to investigate which aspects of pressure variations (e.g. amplitude, sign etc.) influence pressure comfort or discomfort and to inspect thresholds above which passengers declare to experience feelings of discomfort. Particularly with regard to the upcoming changes in tunnel constructions, this information will be useful to decide on the necessity of measures regarding the reduction of pressure variations on a train.

## **Study 1: Prioritization of comfort aspects by railway passengers**

## **2. Material and Methods**

### **2.1 Comfort questionnaire**

The questionnaire is based on an in-flight and a ground-based questionnaire from Ransome Airlines and the University of Virginia which were developed to investigate the needs of airline passengers in order to improve satisfaction with civil aircraft transportation (Richards and Jacobson, 1975; Richards et al., 1978). Parts of these questionnaires were adopted and modified for railway passengers. The questionnaire of the present study included items about the passengers' age, gender and if they predominantly use the train for commuter, business or private purposes. Beyond that, the questionnaire inquired attitudes of passengers towards going by train and the relative relevance of various environmental aspects for a comfortable railway journey. Moreover, we asked about the frequency of performing several activities on a train that can be seen in relation to comfort expectations of a passenger.

### **2.2 Data collection and statistical analysis**

The questionnaire survey was carried out in May and August 2009. Questionnaires were distributed at the city train platform Cologne-Porz/Wahn, Germany

on the one hand and at the ICE platform Siegburg/Bonn, Germany on the other hand. At each location 250 questionnaires were handed out with a stamped addressed envelope. The questionnaires were anonymous, and passengers were free in their decision to participate and return the questionnaire via mail. To address mostly commuters and business travelers, we distributed the questionnaires in the early morning (between 6 and 9 a.m.).

The rate of response, i.e. returned questionnaires amounted to 61.8%. “Comfort on a train” seems to be an important issue for rail travelers and the completion of the questionnaire meets the passengers need to communicate their open wishes for the current rail system. Incomplete and inconsistent questionnaires ( $N = 30$ ) were excluded as well as questionnaires of persons traveling for private purposes or showing unusual combinations of train type and purpose of travel ( $N = 17$ , e.g. business travelers using the city train). In the end data of 112 commuters (city train), 109 commuters (ICE) and 41 business travelers (ICE) could be utilized for further analysis.

Since ratings were not normally distributed (Kolmogorov-Smirnov-Test,  $p < .001$ ), data were analyzed using the nonparametric Mann-Whitney  $U$ -test. All significant test results were adjusted using the Bonferroni-Holm procedure (Holm, 1979).

The comparison between commuters (ICE) and business travelers (ICE) showed, except for the item “walking in the aisle” ( $Z = -3.07$ ,  $p = .002$ ), no significant differences. Therefore, they were combined to one group of ICE passengers and compared as a whole with the second group of city train passengers.

### **3. Results**

#### **3.1 Subjects**

The group of ICE passengers consisted of 122 men and 27 women (one missing value) between 20 and 58 years ( $M = 41.4$ ,  $SD = 9.2$ ). The group of city train passengers enclosed 61 men and 51 women. These passengers were aged between 18 and 64 ( $M = 39.3$ ,  $SD = 12.3$ ).

### 3.2 Attitude towards going by train

In Figure 1 mean values of questions concerning the attitude towards going by train are illustrated. The comparison between ICE and city train passengers revealed significant differences for 7 out of 9 items.

Whereas ICE passengers agree significantly more with the statement “I like going by train” ( $Z = -3.23$ ,  $p = .001$ ), city train passengers show a significantly higher agreement with the statements “I avoid using the toilet on a train” ( $Z = -4.20$ ,  $p < .001$ ), “I’m annoyed by the narrowness on a train” ( $Z = -2.53$ ,  $p = .011$ ), “I have no special attitude towards going by train” ( $Z = -2.76$ ,  $p = .005$ ), “I don’t like going by train at all” ( $Z = -2.49$ ,  $p = .013$ ), “I feel sick on a train” ( $Z = -3.56$ ,  $p < .001$ ) and “I easily panic on a train” ( $Z = -3.75$ ,  $p < .001$ ).

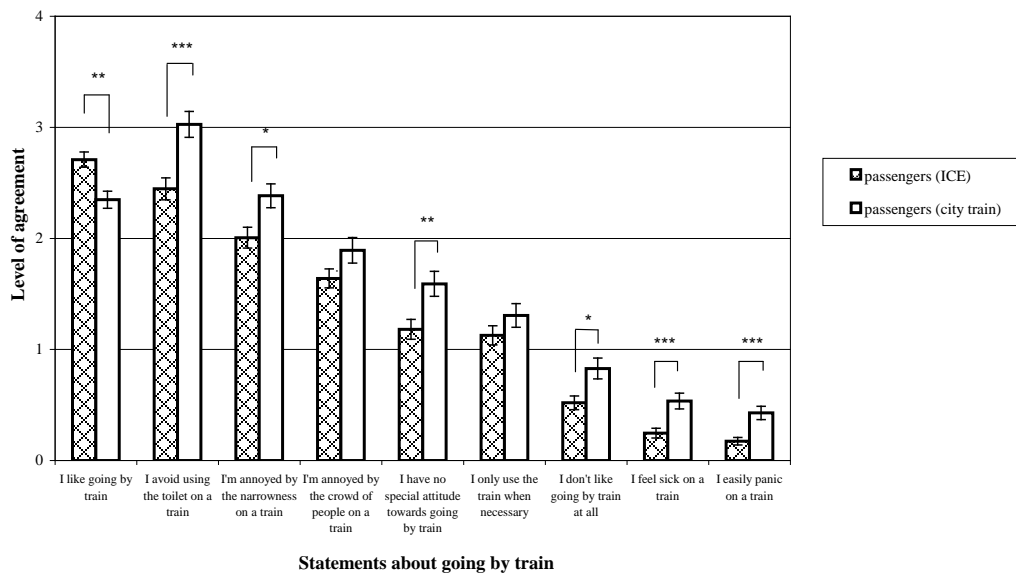


Figure 1: Attitude towards going by train (“Please indicate to what extent you agree with the following statements”. Mean values on a five-point rating scale from “0 = I don’t agree at all” to “4 = I totally agree” and standard errors); \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$ , considering the adjusted  $\alpha$ -levels according to Bonferroni-Holm.

### 3.3 Relevance of environmental aspects for feelings of comfort

The relative relevance of various environmental aspects on a train is presented in Figure 2. With few exceptions climatic aspects such as odor, air quality, air ventilation and temperature seem to be most important for passengers (both groups) in determining their level of comfort in a railway carriage, followed by seat and space factors and lastly by dynamic factors like vibration and motion. Air pressure on a train was evaluated as being of moderate importance only.

The group of ICE passengers assessed the relevance of environmental aspects consistently higher than the group of city train passengers. The only significant difference between ICE and city train passengers concerned the importance of “workspace” which was rated significantly higher by ICE passengers ( $Z = -6.86$ ,  $p < .001$ ).

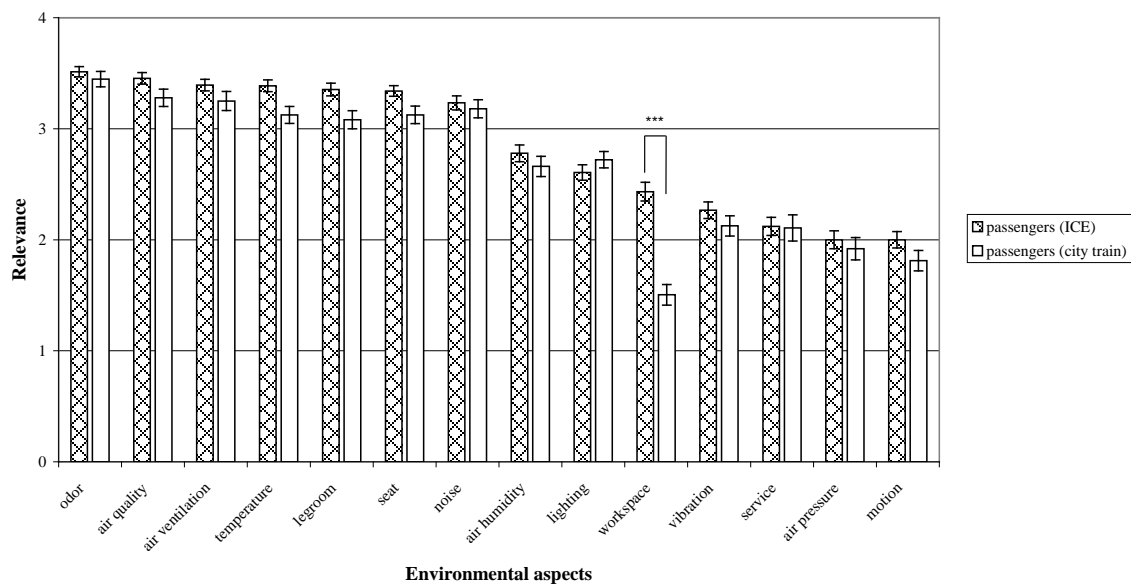


Figure 2: Relevance of environmental aspects for feelings of comfort during a railway journey (“Please indicate how relevant the following aspects are to your feelings of comfort on a train”. Mean values on a five-point rating scale from “0 = not relevant” to “4 = very relevant” and standard errors); \*\*\*  $p < .001$ , considering the adjusted  $\alpha$ -levels according to Bonferroni-Holm.

### 3.4 Activities during a railway journey

With respect to the frequency of performed activities during a railway journey the analysis revealed group differences of ICE passengers and those using the city train (see Figure 3). The activities “working” ( $Z = -8.10$ ,  $p < .001$ ), “sleeping” ( $Z = -4.91$ ,  $p < .001$ ), “eating and drinking” ( $Z = -3.68$ ,  $p < .001$ ) and “writing” ( $Z = -4.10$ ,  $p < .001$ ) are performed significantly more frequent by ICE passengers than by city train passengers. On the contrary, city train passengers stated to pass time significantly more often by “looking out the window” ( $Z = -5.97$ ,  $p < .001$ ) and “daydreaming” ( $Z = -2.75$ ,  $p = .006$ ).

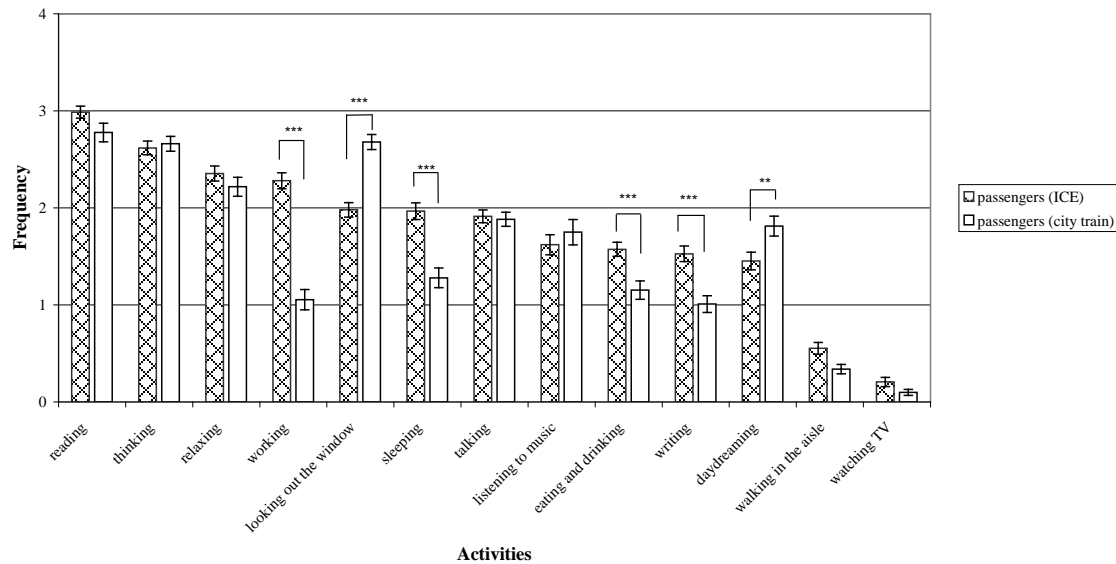


Figure 3: Frequency of activities on a train (“Which activities do you usually perform on a train?” Mean values on a five-point rating scale from “0 = never” to “4 = always” and standard errors); \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$ , considering the adjusted  $\alpha$ -levels according to Bonferroni-Holm.

## **Study 2: Influence of pressure variations on perceived discomfort**

### **4 Material and Methods**

#### **4.1 Subjects**

For the recruitment of subjects a database of persons who took part in former studies of the DLR Institute of Aerospace Medicine was used. In order to select healthy individuals, persons who applied for participating in the laboratory study were sent a questionnaire in advance. Primarily, it contained questions on the person's state of health (hearing loss in the past, problems regarding pressure equalization when flying or diving etc.). Subjects with a claustrophobic tendency were excluded from participating in the laboratory experiment because of the cramped conditions inside the pressure chamber. An extract from the comfort questionnaire used in study 1 aimed at collecting information on possible moderators regarding comfort assessments of pressure variations on a train. We asked for the subjects' age and gender and if they predominantly use the train as commuter, business traveler or for private purposes. Moreover, attitude towards using the train as a mode of transport as well as the relative importance of various comfort aspects were acquired.

We conducted our laboratory study with a total of 31 subjects, 16 men and 15 women. They were aged 19 to 71 ( $M = 37.7$ ,  $SD = 12.7$ ). The study was approved by the local ethics committee. Subjects gave written informed consent prior to study participation. They were free to discontinue the study at any time.

#### **4.2 Experimental design**

The laboratory study took place in the pressure chamber of the DLR Institute of Aerospace Medicine, Department of Flight Physiology. Due to the limited space inside the pressure chamber subjects were divided into six subgroups.

Within the laboratory experiment generic pressure variations which had been carefully selected by a pre-test were presented to each subgroup. The pressure changes were chosen according to the requirements of being noticeable on the one hand and

including but not exceeding the medical limit of 100 mbar pressure amplitude on the other hand (UIC Leaflet 779-11, 2005). Table 2 shows the 30 selected combinations of pressure differences and time periods. The pressure amplitude varied from 1 to 100 mbar with durations of 1 to 100 s. The rate of pressure change, defined as pressure amplitude (in mbar) per second, includes values from 0.2 mbar/s up to 12.5 mbar/s. Combinations with a rate of pressure change of 1 mbar/s can be found on the diagonal.

*Table 2: Selected combinations of pressure differences (amplitudes in mbar) and time periods (duration of pressure changes in seconds); within cells: rate of pressure change (mbar/s). Pressure change combinations belonging to one category are framed.*

	1 mbar	2 mbar	5 mbar	10 mbar	25 mbar	50 mbar	100 mbar
1 s	1	2	5	10			
2 s	0.5	1	2.5	5	12.5		
5 s		0.4	1	2	5	10	
10 s		0.2	0.5	1	2.5	5	
25 s			0.2	0.4	1	2	
50 s				0.2	0.5	1	2
100 s					0.25	0.5	1

A Visual Basic program was developed to randomize the pressure change combinations in order to avoid sequence effects. Boundary condition for the program was the guideline not to leave the possible range for regulating pressure changes in the chamber. First, five categories were built consisting of six pressure changes each (pressure change combinations belonging to one category are framed, see Table 2). The categories were formed with regard to a similar duration of the pressure changes. To build blocks of ten pressure changes the program selected one pressure change of each category, i.e. five pressure changes in a random way and added a positive and a negative sign to realize a pressure increase and a pressure decrease. In this way nearly equal lasting blocks were generated. The blocks as well as the pressure changes within a block were randomized for each study group.

### 4.3 Pressure chamber

The pressure chamber TITAN served for the realization of the laboratory experiment (see Figure 4). The chamber system consists of three compartments which are separated by pressure locks. The compartments are connected by large stainless steel

tubes with specialized fast acting valves outside of the chamber. The valves are controlled by a real time computer system, allowing the reproduction of complex pressure profiles with high accuracy and gradients up to 100 mbar per second.

Subjects were seated in the main compartment (volume of about 20 m<sup>3</sup>) where pressure changes occurred. This part is located in the middle of the chamber. The second part contains elevated pressure or ambient pressure to generate pressure increases in the main compartment. The third part serves as a vacuum reservoir to generate pressure decreases in the main compartment.

The control of pressure in the chamber with high flow-rates causes noise. For realizing comfort studies the chamber was equipped with a sound absorber. Additionally, a loudspeaker system was installed for simulating the acoustical environment within a railway carriage.

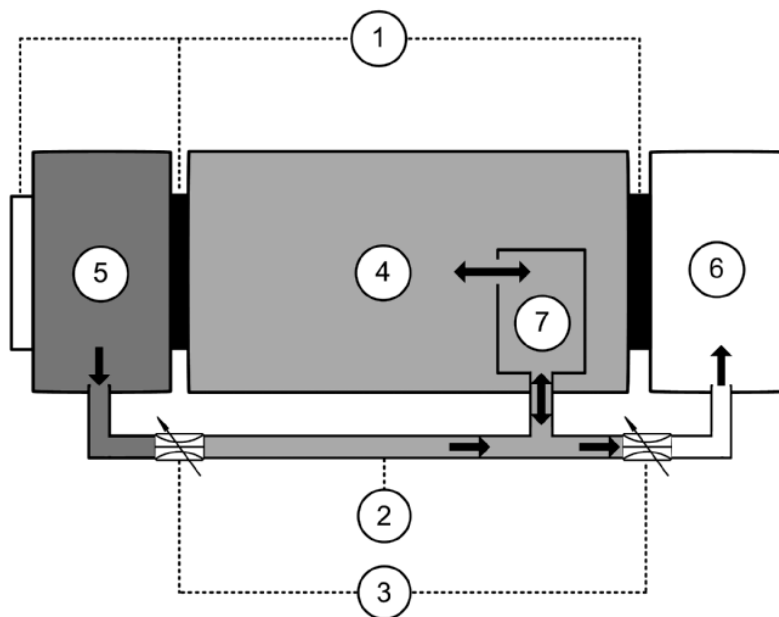


Figure 4: Schematic diagram of the pressure chamber TITAN. 1= pressure locks; 2 = stainless steel tubes; 3 = valves; 4 = main part of the chamber with space for up to six subjects; 5 = compartment with elevated or ambient pressure; 6 = vacuum reservoir; 7 = sound absorber.

#### 4.4 Assessment of pressure comfort

The assessment of pressure comfort was conducted in accordance with Branton (1969) who propagated measuring comfort in terms of its absence i.e. several degrees of discomfort. Subjects assessed the degree of individual discomfort caused by pressure differences. For that purpose they were given a seven-point rating scale from “0 = not at



all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”. If a pressure change was not noticeable at all, the subjects were instructed to check “0” as well.

## **4.5 Experimental procedure**

At the beginning of the laboratory study the subjects were not informed about the intensity of pressure changes to ensure an unbiased assessment of the individually perceived discomfort.

Subjects were exposed to 60 different pressure changes, each followed by a break of 30 s with constant pressure. This was meant to give them time to clear their ears and to fill in the questionnaire. The break-interval was chosen as a compromise between giving time to recover (passively or actively equalizing pressure) on the one hand and avoiding unreasonably long durations of stay in the pressure chamber on the other hand.

After each block consisting of ten pressure changes the block should be assessed in total to gain information about the generation of a global impression. The break-interval between the six blocks was extended to 1 min.

During the experiment we presented background noise with a constant sound pressure level of 65 dB(A) simulating the acoustical environment on a train. This non-varying sound should support the atmosphere of sitting in a railway carriage without influencing pressure assessments. Moreover, it was meant to mask the operating noises of the pressure chamber.

# **5 Results**

## **5.1 Descriptive results of the comfort questionnaire**

23 subjects reported that they used the train predominantly for private traveling, six subjects mostly as commuters and two subjects mostly for business trips. They declared a fairly positive attitude towards using the train as a mode of transport. The statement “I like going by train very much” achieved a mean value of  $M = 2.7$  ( $SD = 0.9$ ) on a five-point rating scale from “0 = I don’t agree at all” to “4 = I totally

agree”. As far as different environmental aspects on a train are concerned, Figure 5 shows the mean values of their relative importance for determining the subjects’ feelings of comfort (again on a five-point rating scale from “0 = not relevant” to “4 = very relevant”). Evidently, prior to the experiment subjects classify climatic and spatial factors as more important for a comfortable journey than air pressure. This result is comparable to that of study 1 both with regard to the ranking of environmental aspects for feelings of comfort as well as the total value of the relevance assessments. In study 2 air pressure scored higher in the ranking list, but the absolute value was quite comparable to that of study 1 (see section 3.3).

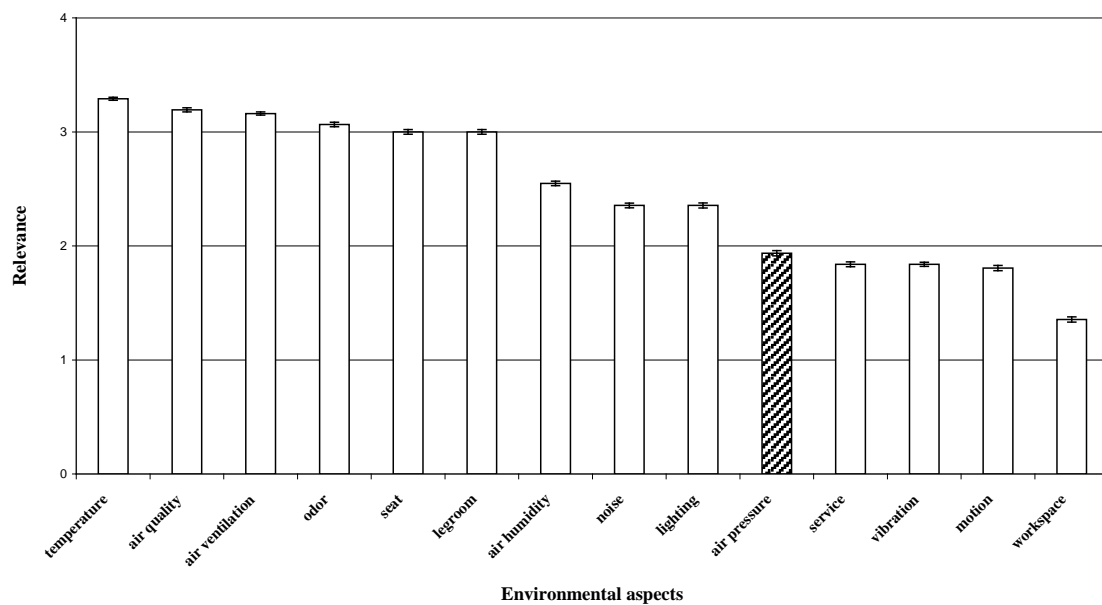


Figure 5: Relevance of environmental aspects for feelings of comfort during a railway journey (“Please indicate how relevant the following aspects are to your feelings of comfort on a train”. Mean values on a five-point rating scale from “0 = not relevant” to “4 = very relevant” and standard errors; striped column: comfort aspect under investigation).

## 5.2 Discomfort assessments of single pressure changes

Figure 6 depicts discomfort assessments for pressure changes of different pressure amplitudes and durations (mean values on a seven-point rating scale from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”). Apparently, pressure combinations of higher amplitudes and shorter durations are assessed more uncomfortable. If the threshold value to perceived discomfort is set beyond the value

“3 = moderately uncomfortable”, a pressure change with an amplitude of 10 mbar within 1 s exceeds the threshold. If the pressure change lasts 5 s, a pressure amplitude of 25 mbar results in a comparable mean assessment of perceived discomfort.

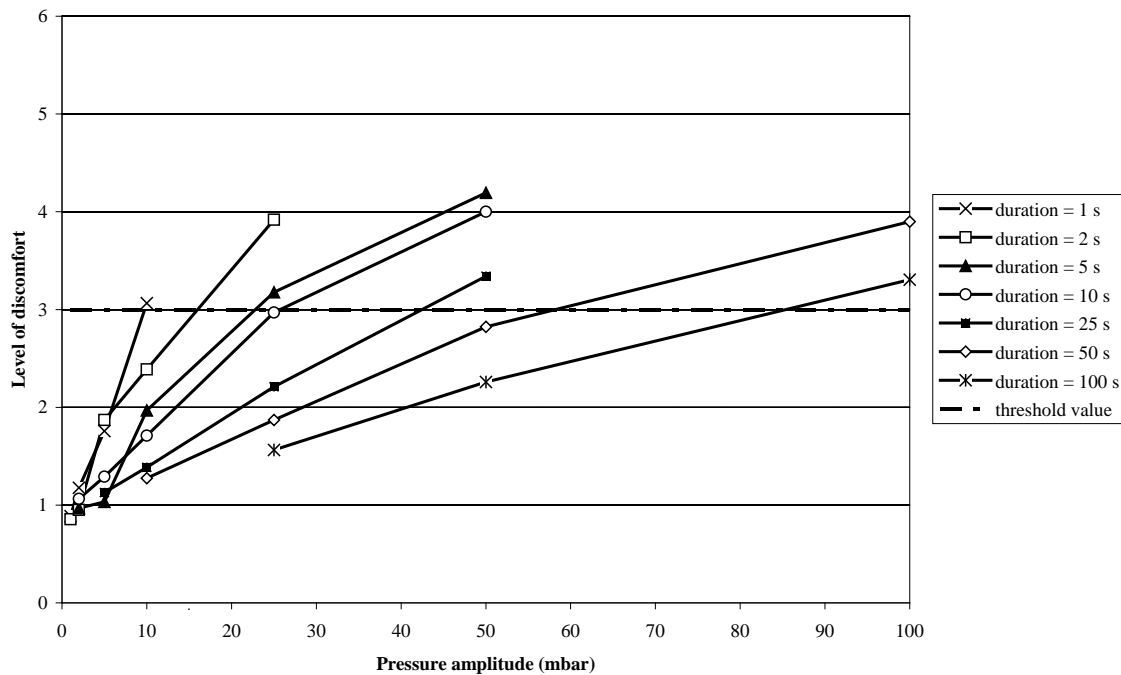


Figure 6: Discomfort assessments of different pressure amplitudes (mean values on a seven-point rating scale from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”) illustrated for different durations of pressure changes; dashed line: discomfort threshold (above: fairly to extremely uncomfortable).

In Table 3 and Table 4 mean discomfort assessments and corresponding standard deviations are presented for pressure increases and pressure decreases separately. Obviously, in almost all cases a pressure increase is perceived as being more uncomfortable than a pressure decrease. Pressure combinations with equal rates of pressure changes are assessed more negatively when combinations with higher amplitudes are examined.

In addition to the assessment of single pressure changes a more general impression has been examined by requesting an assessment of perceived discomfort each time after presenting a block of ten randomized pressure changes.

The global assessment correlated highest with the mean of the ten corresponding single discomfort assessments ( $r = .809$ ,  $p < .001$ ). The correlation of the global value was slightly higher to the second half of pressure changes within each block compared to the first half ( $r = .790$ ,  $p < .001$  compared to  $r = .641$ ,  $p < .001$ ).

*Table 3: Mean assessments and standard deviations of selected pressure decrease combinations (seven-point scale from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”).*

	1 mbar	2 mbar	5 mbar	10 mbar	25 mbar	50 mbar	100 mbar
<b>1 s</b>	<b>0.94</b> (0.93)	<b>1.06</b> (0.81)	<b>1.58</b> (0.92)	<b>2.94</b> (1.32)			
<b>2 s</b>	<b>0.68</b> (0.66)	<b>0.84</b> (0.78)	<b>1.58</b> (1.15)	<b>2.06</b> (1.18)	<b>3.68</b> (1.22)		
<b>5 s</b>		<b>0.94</b> (1.03)	<b>0.81</b> (0.70)	<b>1.71</b> (0.97)	<b>2.71</b> (1.16)	<b>3.87</b> (1.12)	
<b>10 s</b>		<b>1.00</b> (0.82)	<b>1.06</b> (1.03)	<b>1.42</b> (1.09)	<b>2.68</b> (1.28)	<b>3.61</b> (1.28)	
<b>25 s</b>			<b>1.13</b> (1.02)	<b>1.29</b> (1.16)	<b>1.97</b> (0.75)	<b>2.94</b> (1.21)	
<b>50 s</b>				<b>1.26</b> (0.93)	<b>1.71</b> (0.90)	<b>2.39</b> (0.88)	<b>3.45</b> (1.21)
<b>100 s</b>					<b>1.42</b> (0.89)	<b>2.03</b> (1.14)	<b>2.87</b> (1.09)

*Table 4: Mean assessments and standard deviations of selected pressure increase combinations (seven-point scale from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”).*

	1 mbar	2 mbar	5 mbar	10 mbar	25 mbar	50 mbar	100 mbar
<b>1 s</b>	<b>0.84</b> (0.90)	<b>1.29</b> (1.07)	<b>1.94</b> (0.97)	<b>3.19</b> (1.54)			
<b>2 s</b>	<b>1.03</b> (0.95)	<b>1.06</b> (0.93)	<b>2.16</b> (1.27)	<b>2.71</b> (1.07)	<b>4.16</b> (1.10)		
<b>5 s</b>		<b>1.00</b> (1.13)	<b>1.26</b> (0.77)	<b>2.23</b> (1.28)	<b>3.65</b> (1.31)	<b>4.52</b> (1.06)	
<b>10 s</b>		<b>1.13</b> (0.81)	<b>1.52</b> (1.15)	<b>2.00</b> (0.78)	<b>3.26</b> (1.18)	<b>4.39</b> (1.28)	
<b>25 s</b>			<b>1.13</b> (1.06)	<b>1.48</b> (1.03)	<b>2.45</b> (1.18)	<b>3.74</b> (1.15)	
<b>50 s</b>				<b>1.29</b> (1.04)	<b>2.03</b> (1.08)	<b>3.26</b> (1.26)	<b>4.35</b> (1.28)
<b>100 s</b>					<b>1.71</b> (0.94)	<b>2.48</b> (1.12)	<b>3.74</b> (1.13)

### 5.3 Results of a random effects linear regression analysis

Dose-response relationships for discomfort assessments due to pressure changes were calculated by means of a linear mixed model (LMM) which takes the dependence of observations and therefore the correlation of error terms into consideration. The linear “mixed” model terminology points to the fact that both fixed effects and random effects are included. The random effects take into account that the subjects are only a small subset of the entire population.

A complete model selection was conducted to find a model which fits the data adequately. Table 5 summarizes the results of the random effects linear regression (software SPSS for Windows, Version 11.5).

*Table 5: Random effects linear regression model based on 31 subjects. Impact of pressure change parameters on discomfort assessments (positive coefficient corresponds to higher discomfort).*

	Coefficient	Standard error	p-value
Intercept	0.8138	0.1164	< .001
Pressure amplitude (absolute value)	0.0275	0.0014	< .001
Sign (numerical; 1 = positive)	0.2797	0.0573	< .001
Rate of pressure change (absolute value)	0.1753	0.0081	< .001
Assessment of prior pressure change	0.0672	0.0153	< .001
Duration of pressure change	-0.0053	0.0011	< .001
Pressure amplitude x sign	0.0075	0.0016	<.001
Random subject effect	0.2706	0.0541	

Pressure amplitude (absolute value) had a statistically significant influence on discomfort assessments. The higher the pressure amplitude is, the stronger the feeling of discomfort. Sign of pressure change, dummy coded with 0 for pressure decrease and 1 for pressure increase, showed a significant effect as well. If the sign of pressure change is positive, the discomfort is higher compared to a pressure change with negative sign. As far as the duration of pressure changes is concerned, the negative sign of the coefficient indicates that a longer lasting pressure change is associated with a significantly more comfortable assessment on the rating scale. Rate of pressure change (absolute value) was additionally incorporated in the model (pressure amplitude  $\times$   $1/\text{duration}$ ). It can be interpreted as an interaction that implies nonlinear effects for high pressure amplitudes combined with a short duration of the pressure change insofar that the effect on discomfort is strengthened. A higher rate of pressure changes caused significantly higher discomfort assessments.

Furthermore, there was a significant interaction between pressure amplitude and sign of pressure change. For higher pressure amplitudes the differences between the assessments of pressure increases and decreases became larger. More precisely, for high pressure amplitudes a pressure increase compared to a pressure decrease caused even stronger feelings of discomfort.

Additionally, the assessment of the pressure change preceding the current change was incorporated in the model as a further significant parameter.

Age and gender as socio-demographic features, the attitude towards going by train and the subjects' ranking of air pressure have been tested as possible moderators. The analysis revealed that they had no significant influence on the assessment of discomfort.

## 5.4 Results of a random effects logistic regression analysis

A random effects logistic regression allows predictions regarding the probability to perceive a specific pressure change in a railway carriage as either comfortable or uncomfortable. Statements can be derived about percentages of travelers that feel dissatisfied due to a certain pressure variation. To calculate the model, the dependent variable "assessment of single pressure change" was transformed into a dichotomous variable. Based on the denotation of the scale points the categories 0 ("not at all uncomfortable") to 3 ("moderately uncomfortable") of the seven-point rating scale were combined into the value 0 to represent the global category "comfortable". The

categories 4 (“fairly uncomfortable”) to 6 (“extremely uncomfortable”) were combined into the value 1 meaning “uncomfortable”.

For facilitating a direct comparison, the same parameters as in the random effects linear regression (see Table 5) were incorporated in the modeling process. The results of the random effects logistic regression are given in Table 6.

*Table 6: Random effects logistic regression model based on 31 subjects. Impact of pressure change parameters on discomfort assessments (positive coefficient corresponds to higher discomfort).*

	Coefficient	Standard error	p-value
Intercept	-5.5431	0.4806	< .001
Pressure amplitude (absolute value)	0.0627	0.0058	< .001
Sign (numerical; 1 = positive)	0.9776	0.2725	< .001
Rate of pressure change (absolute value)	0.3264	0.0310	< .001
Assessment of prior pressure change	0.1080	0.0581	.06
Duration of pressure change	-0.0290	0.0054	< .001
Pressure amplitude x sign	0.0168	0.0060	< .01
Random subject effect	1.840	0.2634	

Obviously, except for the psychological parameter “assessment of prior pressure change” which obtains marginal significance, all physical parameters show significant effects on the dependent variable.

Figure 7 depicts different amplitude/time combinations of pressure indicating the percentage of dissatisfied passengers. For example, the percentage of travelers perceiving discomfort was below 50% for pressure variations not exceeding

approximately 30 mbar within a 5 s interval, considering the assumptions given in Figure 7.

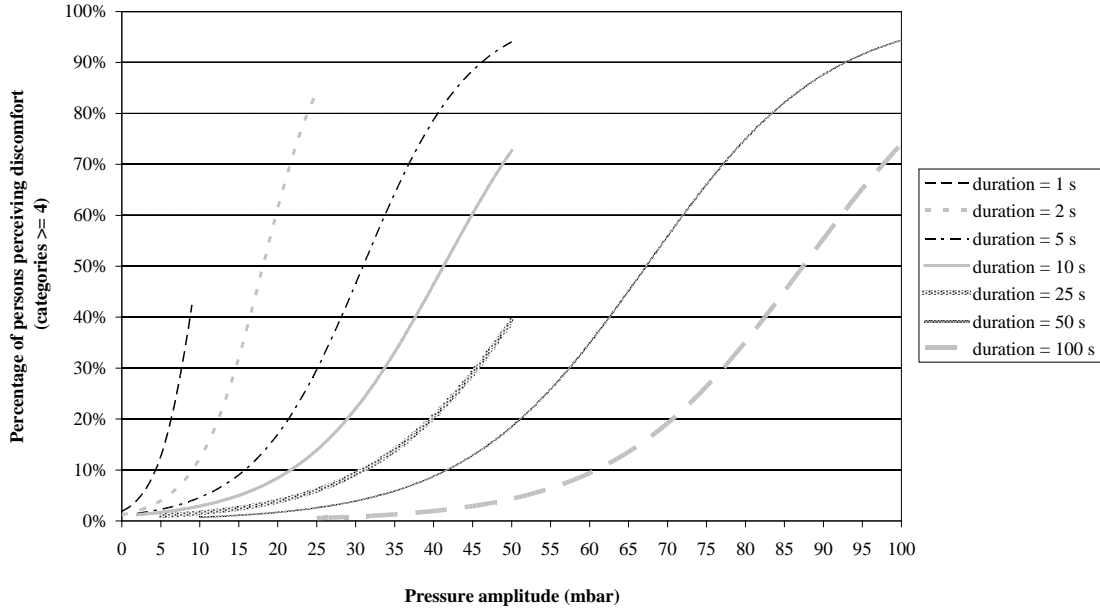


Figure 7: Logistic dose-response relationships of pressure amplitude and perceived discomfort regarding different durations of pressure changes based on the logistic regression model of Table 6. Assumptions: positive sign of pressure change, assessment of prior pressure change = 2.12 (mean).

## 6 Discussion

### 6.1 Prioritization of comfort aspects by railway passengers (study 1)

Study 1 was primarily undertaken to provide information on the current ranking of air pressure on a train compared to other environmental aspects. Furthermore, a general attitude towards this mode of transport and the frequency of performing several activities was acquired.

The analysis of statements about using the train apparently revealed a more positive assessment by ICE passengers in contrast to city train passengers. This may be due to a higher overall comfort standard of the ICE.



Both groups rated climatic and spatial factors as being more important for the determination of comfort than air pressure. At present times most air pressure fluctuations on a train are of moderate pressure change rate and amplitude. It is not astonishing that these pressure changes are mostly tolerated by passengers. But with regard to the upcoming tunnel construction guidelines of the Federal Railway Authority (Eisenbahnbundesamt, 2008) the pressure changes will become more severe in the future. The decisive factor for scoring the relevance of workspace higher or lower seems not to be the type of passenger (commuter versus business traveler), but the type of train and the amount and nature of time spent in it. Average travel time of ICE passengers is longer than that of city train passengers, both for business travelers and commuters. Furthermore, the group of ICE passengers finds itself in a quieter environment with better working conditions. Their chance to use travel time in a productive way is much higher than in a more turbulent surrounding on a city train. The latter is mostly connected to a high frequency of railway stations and many fellow travelers streaming in and out. The assumption that variables like noise and vibration which may influence the ability to work efficiently are rated higher by business travelers could not be confirmed.

With respect to the mean frequency of activities, the two types of passengers (commuter versus business traveler) did not differ significantly. In essence, there seem to exist distinctive groups using different types of trains. Whereas time in an ICE is taken advantage of, be it productively (working, writing), for relaxation (sleeping) or to refill energy reserves in terms of eating and drinking, passengers in a city train show the tendency to just let the travel time pass by. Obviously, there is a direct connection between the environment and the frequency of activities passengers follow.

## **6.2 Influence of pressure variations on perceived discomfort (study 2)**

Study 2 focused on air pressure fluctuations as a comfort aspect that is subject to changes in the near future. It was conducted to gain information on specific aspects of pressure changes that contribute to discomfort on the passenger side. The examination of single pressure changes resulted in moderate discomfort assessments by most of the subjects. Higher amplitudes, higher rates of change and shorter durations of pressure

changes led to higher discomfort. The distribution of single values attested a wide interindividual variability as far as the perception of pressure changes is concerned. The global assessment of a block correlated slightly higher with the second half of pressure changes of a block. This result highlights the necessity to present pressure variations within laboratory experiments in a randomized order. The fact that subjects seem to take prior pressure changes into account when assessing the current pressure change also points to the importance of randomizing the presentation of pressure variations. The perception of pressure increases as being worse than pressure decreases is a phenomenon which can be explained by physiological processes. If the outside pressure decreases, the middle ear is usually automatically ventilated. However, if outside pressure increases, the lower pressure in the middle ear may have to be actively equalized by means of swallowing or yawning.

The results of the regression analyses are useful to derive thresholds regarding the perception of aural discomfort. Our investigation covers a much broader range of pressure change combinations, both for longer time periods and for higher pressure amplitudes, compared to the pressure criteria defined by UIC. Additionally, the results are differentiated for pressure increases and pressure decreases. The random effects linear regression analysis provides predictions of discomfort assessments corresponding to the defined time periods and maximum pressure amplitudes from UIC guidelines. All predicted values are located below the threshold to discomfort (see Table 7), if this is set to “3 = moderately uncomfortable” which is a somewhat arbitrary decision. The definition of the threshold is based on the denotation of the scale points. Other thresholds are conceivable as well. If it is the goal to realize not only tolerable but really comfortable conditions on a train, the threshold value to discomfort could alternatively be set to the scale point “2 = slightly uncomfortable”. This would result in lower admissible pressure amplitudes within defined time periods. Even if it is set beyond “2 = slightly uncomfortable” only the first combination of  $\leq 5$  mbar within 1 s defined by UIC would exceed the threshold.

*Table 7: Comfort criteria of UIC (UIC Leaflet 779-11, 2005, see Table 1) regarding pressure variations in railway carriages and predicted discomfort assessments for maximum pressure variation within time interval investigated in study 2 (seven-point scale from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”).*

Time interval	Maximum pressure variation within time interval	Predicted discomfort assessment
1 s	$\leq 5$ mbar	2.28
3 s	$\leq 8$ mbar	1.97
10 s	$\leq 10$ mbar	1.71
60 s	$\leq 20$ mbar	1.68

The results of the random effects logistic regression are application-oriented and enable decision makers to get an idea of the proportion of passengers which would declare specific pressure changes as uncomfortable. Insofar both analyses – the linear and the logistic regression – provide similar results but represent different degrees of abstraction. In order to meet requirements of the passengers concerning pressure variations on a train, decision makers have to decide about the desired comfort assessments by passengers i.e. the percentage of passengers falling into the group of satisfied persons.

Socio-demographic factors like age and gender that have been suggested to be potential moderators did not influence the assessments significantly. This may be a result of the moderate number of investigated subjects and the limited age range. Moreover, attitude towards going by train and ranking of air pressure had no significant influence on the perceived discomfort. In further studies possible influences of these variables could be investigated on larger samples.

To find comfort criteria for groups with different sensibilities for pressure changes, a larger, layered sample should be investigated as well. Of note, all subjects that participated in the laboratory experiment were healthy. It is therefore unclear to what degree the findings of our study extend to non-healthy populations. Pressure

equalization may be harder for those with ear infections or common colds, elderly or children. In further studies subjects suffering from problems regarding pressure equalization may be included. A comparison of healthy passengers with subgroups of highly sensible passengers would be a worthwhile future research project.

In the present laboratory experiment, subjects were given time for pressure equalization between the presentations of different pressure changes. A chain of pressure events during a railway journey with much less time for ear clearing could lead to worse pressure change assessments. The subjects were highly concentrated on the assessment of pressure changes. In an actual railway carriage there are many other environmental aspects that may interact and therefore modify the sensation of pressure variations. Additionally, the particular context has to be taken into account when testing comfort or discomfort. For instance, Ellegast et al. (2012) and Groenesteijn et al. (2012) stressed the role of particular activities that have to be considered in the case of seat comfort or discomfort assessments.

The advantage of investigating pressure comfort in a real railway surrounding is the higher external validity. The findings may be connected and compared to those of systematic and better controllable laboratory experiments. We conducted a field study on the railway track Cologne-Rhine/Main, Germany and a simulation study in our pressure chamber TITAN. Current pressure comfort was examined continuously using sliders. The results in field and laboratory showed high comparability, pressure variations were mostly tolerated (Schwanitz, Wittkowski, Rolny, Samel & Basner, 2012).

As soon as the first tunnels with a reduced cross section are set into operation, further research will be worthwhile investigating the impact of these infrastructural changes on aural discomfort in railway passengers.

## **6 Conclusions**

Pressure variations on a train will be more prevalent in the near future considering German guidelines for tunnel construction enhancing the severity of aerodynamic effects. At present, climatic and spatial aspects on a train seem to be more relevant for passenger comfort than pressure variations. Differences in attitudes towards going by train, the relevance of comfort aspects and performed activities do not differ

with type of passenger but with type of train (ICE versus city train) and related comfort expectations. Time in an ICE is treated as valuable time (productive time, sleep time, time to eat/drink), whereas time in a city train mainly passes by.

The systematic investigation of pressure differences between 1 and 100 mbar covers broader ranges of pressure events than existing comfort criteria consider and differentiates pressure increases and decreases. Thresholds are derived for healthy people. Design engineers may consider our findings with regard to changes in tunnel construction in the near future. Further research would be worthwhile inspecting thresholds for vulnerable groups (e.g. elderly, children) and examining the impact of reduced tunnel cross sections on aural discomfort as soon as these tunnels are set into operation.

### *Acknowledgements*

We gratefully thank Helga Buess, Astrid Linke-Hommes, Louise Mawet, Ernst-Wilhelm Müller, Sibylle Pennig, Julia Quehl, Daniel Rooney, Stefan Schmitt, Martin Vejvoda, Jürgen Wenzel for their support of this work. The studies were part of the DLR-project “Next Generation Train”. This work will be submitted to Technische Universität Darmstadt as part of a doctoral thesis under supervision of Professor Joachim Vogt, work and engineering psychology group.

### *References*

- Branton, P. (1969). Behaviour, body mechanics and discomfort. *Ergonomics*, 12, 316-327.
- Ellegast, R.P., Kraft, K., Groenesteijn, L., Krause, F., Berger, & H., Vink, P. (2012). Comparison of four specific dynamic office chairs with a conventional office chair: impact upon muscle activation, physical activity and posture. *Applied Ergonomics*, 43, 296-307.
- Eisenbahnbundesamt [Federal Railway Authority] (2008). *Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln* [Requirements for fire and civil protection in the construction and operation of railway tunnels]. Retrieved February 22, 2011, from [http://www.eba.bund.de/cln\\_031/SharedDocs/Publikationen/DE/Infothek/Infrastruktur/Tunnelbau/21\\_\\_rl\\_\\_tunnelbau,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/21\\_\\_rl\\_\\_tunnelbau.pdf](http://www.eba.bund.de/cln_031/SharedDocs/Publikationen/DE/Infothek/Infrastruktur/Tunnelbau/21__rl__tunnelbau,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/21__rl__tunnelbau.pdf)
- Gawthorpe, R.G. (2000). Pressure effects in railway tunnels. *Rail International*, 31, 10-17.
- Groenesteijn, L., Ellegast, R.P., Keller, K., Krause, F., Berger, H., & de Looze, M.P. (2012). Office task effects on comfort and body dynamics in five dynamic office chairs. *Applied Ergonomics*, 43, 320-328.
- Hagenah, B., Reinke, P., & Vardy, A.E. (2006). Effectiveness of pressure relief shafts – full scale assessment. In: A.E. Vardy (Ed.), *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, 11-13 July, Portoroz, Slovenia (pp. 379-391). Cranfield, Bedford, England: BHR Group.
- Helander, M.G., & Zhang, L. (1997). Field studies of comfort and discomfort in sitting. *Ergonomics*, 40, 895-915.

- Hertzberg, H.T.E. (1972). The human buttock in sitting: pressures, patterns, and palliatives. *American Automobile Transactions*, 72, 39-47.
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6, 65-70.
- McClelland, I.L., & Gawthorpe, R.G. (1986). The response of railway passengers to pressure fluctuations. *Applied Ergonomics*, 17, 305-315.
- Richards, L.G. (1980). On the psychology of passenger comfort. In: D.J. Osborne & J.A. Levis (Eds.), *Human factors in transport research* (pp. 15-23). London: Academic Press.
- Richards, L.G., & Jacobson, I.D. (1975). Ride quality evaluation 1. Questionnaire studies of airline passenger comfort. *Ergonomics*, 18, 129-150.
- Richards, L.G., Jacobson, I.D., & Kuhlthau, A.R. (1978). What the passenger contributes to passenger comfort. *Applied Ergonomics*, 9, 137-142.
- Schwanitz, S., Wittkowski, M., Rolny, V., Samel, C., & Basner, M. (2012). Continuous assessments of pressure comfort on a train – A field-laboratory comparison. *Applied Ergonomics*, doi: 10.1016/j.apergo.2012.04.004
- Slater, K. (1985). *Human comfort*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Suzuki, H. (1998). Research trends on riding comfort evaluation in Japan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 212, 61-72.
- UIC Leaflet 779-11 (2005). *Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations*. Paris: Union Internationale des Chemins de fer.
- Vink, P., & Hallbeck, S. (2012). Editorial: comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model. *Applied Ergonomics*, 43, 271-276.



Zhang, L., Helander, M.G., & Drury, C.G. (1996). Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors*, 38, 377-389.

## **Artikel II: Continuous assessments of pressure comfort on a train – A field-laboratory comparison**

**Sandra Schwanitz<sup>a,\*</sup>, Martin Wittkowski<sup>a</sup>, Vinzent Rolny<sup>a</sup>, Christina Samel<sup>a</sup> and Mathias Basner<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>German Aerospace Center (DLR), Institute of Aerospace Medicine, Department of Flight Physiology, Linder Höhe, 51147 Cologne, Germany

<sup>b</sup>University of Pennsylvania, Perelman School of Medicine, Department of Psychiatry, Division of Sleep and Chronobiology, Philadelphia, USA

\* Corresponding author. Tel.: +49 2203 601 3175; fax: +49 2203 68323; E-mail address: [Sandra.Schwanitz@dlr.de](mailto:Sandra.Schwanitz@dlr.de)

**Article in press („Applied Ergonomics“); available online since April 29, 2012**

### ***Abstract***

Pressure variations on a train predominantly occur while trains are passing through tunnels. These aerodynamic effects may give rise to aural discomfort in railway passengers. We conducted a field study on the high speed railway track Cologne-Frankfurt/Main as well as a simulation study in our pressure chamber TITAN (DLR-Institute of Aerospace Medicine) with 31 subjects (mean age = 37.7, *SD* = 12.7; 51.6% male) to investigate pressure comfort for passengers. Continuous assessments of pressure events using sliders and retrospective assessments were acquired. Pressure variations were mostly tolerated. A comparison of field and laboratory setting revealed high congruency of continuous as well as retrospective assessments. A generalized estimating equation model identified pressure change attributes contributing to passengers' discomfort. Beside attributes of instantaneous pressure changes (e.g. high amplitudes, short durations), pressure events of the recent past significantly influenced current discomfort. Design engineers may use these findings to improve train and tunnel design.

### ***Keywords***

Pressure variation, passenger comfort, railway

# 1. Introduction

Nowadays passengers' requirements concerning public transport are becoming fairly complex. Their expectations concern not only safety and shortness of travel time but also a sufficient degree of passenger comfort (Suzuki, 1998a).

According to Richards (1980) passenger comfort "involves a sense of subjective well-being and the absence of discomfort, stress or pain" (p. 15).

The construct of passenger comfort can be considered from two different points of views. A systems approach focuses on a journey as a whole and the assessment of overall comfort connected to all stages. The investigation of specific aspects a passenger is confronted with during a journey can be ascribed to a behavioral approach. Comfort responses are obtained quantitatively as reactions to stimuli of the passengers' environment (Osborne, 1978b). In our study we took account of this second approach investigating discomfort reactions of subjects due to different intensities of pressure variations within a high speed train, on the one hand, and a pressure chamber, on the other hand.

Changes in air pressure may cause aural discomfort in passengers using high speed transportation (Kobayashi, Suzuki, Akutsu & Ozawa, 1998). On a train, pressure changes are predominantly induced by passing through tunnels. Aerodynamic effects occur in the form of pressure waves that propagate through the tunnel near to sonic speed (McClelland & Gawthorpe, 1986). Air frictions at train surfaces and tunnel walls as well as reflections at the portal lead, in addition to pressure waves induced by the train, to a complex scenario of pressure variations. The magnitude and characteristic of pressure changes is influenced by various parameters. Important factors are (a) construction of tunnels, (b) design of vehicles and (c) train speed.

One possibility to reduce the intensity of pressure variations could be a modification of tunnel configurations: shaping of portals, implementation of air shafts, enlargement of cross-sections.

A further crucial factor concerning the design of vehicles is the extent of sealing of the rolling stock (Gawthorpe, 2000). The sealing quality can be described in terms of a so called pressure tightness coefficient  $\tau$ . It represents the time that passes by until a pressure difference between the exterior and interior of a train falls to circa 37% of the original difference. In a poorly sealed train the transfer of pressure changes from

outside into the railway carriage happens almost undamped. A better sealing of railway carriages leads to longer time periods pressure changes need for being equalized between the exterior and interior of a train (Hagenah & Reinke, 2006). Variations in train speed (i.e. because of compensating delays) lead to smaller or higher variations in pressure during the ride.

Beyond these parameters, also changes in ground level height influence the magnitude and characteristic of pressure variations that occur on a train. Ground level heights induce different signs of pressure changes (pressure increases versus pressure decreases) depending on the direction of travel. A pressure increase riding downhill is inverted into a pressure decrease when the train returns uphill. The effect of differences in ground level heights may therefore strengthen or attenuate the pressure variations induced by passing through a tunnel.

For all these reasons – differences in train sealings, in operational speed, the direction of travel and, connected to that, ground level heights – the pressure profile of each train ride may differ from other rides even on the same railway track. Even the position of a passenger on a train (front, center, rear) may have an effect on the pressure wave received. A superposition of pressure waves, reflections at the portal and a static pressure decrease from train nose to tail results in different aerodynamic effects dependent on the position in the tunnel and inside the train, respectively. Moreover, particular coaches of a train may differ according to pressure tightness.

Field studies on a train can be undertaken to examine the status quo of pressure comfort railway passengers are confronted with at present times. An important advantage of studies in a real railway environment is the ecological validity. Whereas the examination of real passengers would be useful as far as research questions regarding overall comfort are concerned (systems approach), studies involving subjects provide advantages due to the assessment of specific comfort aspects (behavioral approach). Subjects offer the advantage of a higher control for the experimenters insofar that for instance precise instructions can be given (Osborne, 1978b). Comfort assessments can be acquired in a laboratory surrounding as well. Laboratory studies allow the highest control of experimental conditions and procedures but they provide the least naturalistic setting. In contrast to field studies the laboratory environment allows to investigate not only the status quo but also future scenarios. The latest aspect

raises the question of the extent of comparability between field and laboratory studies with respect to discomfort sensations caused by pressure variations.

Methodologically, we aspired to find answers to that question by directly comparing the results of field studies and simulations in the laboratory. Moreover, we aimed to learn about continuous instead of solely retrospective assessments of pressure variations and which aspects mostly influence the process of judging over time. Due to the fact that pressure variations occur with such a high rapidity, assessments using questionnaires could not cover single pressure events. Sliders, however, allow obtaining a continuous judgment of the present state of comfort sensations during a real train ride. The method is based on the so called continuous judgment by category. Originally the method was used to examine the assessment of loudness (Kuwano & Namba, 1985; Kuwano, Namba & Fastl, 1988). In terms of content, insights due to effects of single pressure events and furthermore their overall, cumulative effect on discomfort sensations may help design engineers to decide about the necessity of taking countermeasures and to find promising ways of reducing discomfort (i.e. changes in infrastructure, train sealing, speed limits).

## **2. Material and Methods**

### **2.1 Subjects**

31 healthy subjects (16 men and 15 women) participated in the field and laboratory study. They were between 19 and 71 years old with a mean age of  $M = 37.7$  years ( $SD = 12.7$ ). In the course of the recruitment the persons' state of health especially relative to ear, nose and throat diseases was ascertained. Additionally, prior to the experiments and afterward subjects were checked by means of tympanometry (Onusko, 2004). As an objective method to test the function of the middle ear we used it to ensure that no persistent changes of the middle ear already existed or occurred during the stay within the pressure chamber (see section 2.4). The total of 31 subjects was divided into groups of five persons (except for one study group that consisted of six persons) which participated in the field and laboratory study together.

## 2.2 Field and laboratory setting

The investigation of currently appearing air pressure variations of high speed rail traffic was undertaken using the railway track Cologne-Frankfurt/Main. This railway line suits the requirements of the experiment very well insofar that the train passes lots of tunnels in a relatively short period of time. The tunnels are all double-track tunnels. They have a length of between 552 and 4500 m. High speed long distance trains (so called Intercity Express (ICE)) travel on this railway line with a maximum velocity of 300 km/h. The railway track has a gradient of 4 per cent at maximum. For the field investigation we booked second class tickets. A railway carriage was reserved for the respective study group and two experimenters (see Figure 1). In this way disturbing noises of fellow passengers were prevented.



*Figure 1: Field setting in a railway carriage with technical equipment measuring air pressure variations and acoustics as well as sliders for comfort assessments (see also section 2.3).*

The laboratory study took place in the pressure chamber “TITAN” of the DLR-Institute of Aerospace Medicine, Cologne. The pressure chamber allows the reproduction of pressure profiles with high accuracy. The main compartment of the pressure chamber, where the subjects were seated, has a volume of about 20 m<sup>3</sup> (see Figure 2).



Figure 2: Laboratory setting in the pressure chamber TITAN.

### 2.3 Technical equipment and comfort assessments

Air pressure variations were recorded with a barometric pressure sensor. It was placed on the table of the railway carriage where the subjects were seated. The pressure sensor had a resolution of 0.1 mbar and a relative accuracy of  $\pm 0.5$  mbar in the range of 750 to 1100 mbar. It was factory calibrated and had a drift of less than 1 mbar per year. Additionally, acoustic measurements of the occurring train noise were done by a class 1 sound level meter. For the assessment of pressure comfort sliders were used. In advance to our study sliders were labeled with the word “discomfort” at maximum adjustment. A rising discomfort should be indicated with the slider. In the case of less discomfort the slider should be set back to a lower adjustment. If there was no discomfort at all subjects should set back the slider to the lowest adjustment. The adjustments were stored by the slider as digital data ranging from 0 to 100. Almost immediately after one travel direction a global assessment should be adjusted on the slider retrospectively. Furthermore subjects were given a questionnaire. They were asked to state their overall impression regarding the perceived level of discomfort on a seven-point rating scale (from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”).

## 2.4 Experimental procedure

The field and laboratory study were conducted in September and October 2009. All subjects firstly ran through the field experiment and afterwards through the laboratory experiment. This realized chronological order of first recording data and testing subjects in the train and then repeating the scenario in the pressure chamber was determined by the aim of directly comparing both settings. Sequence effects have been minimized insofar that three study groups were already familiar with being tested within the pressure chamber and with handling the sliders as part of an earlier experiment with a different research question. The other half of the subjects began with the field study and had no former experience with the pressure chamber or the method of using the sliders for assessing pressure comfort (cross-over design).

In the field experiment subjects were exposed to 22 tunnels during a journey of approximately 40 minutes in one direction. The same railway line was used to return. Subjects were made familiar with the sliders during the first minutes from Cologne to Siegburg, the starting point of the high speed railway line. Within this first trial section one tunnel was passed through. Afterwards the record of measuring data started. Not only tunnels should be evaluated but also pressure variations initiated by differences in ground level heights. Between both directions of travel a break of approximately two hours could be used for lunch and relaxation. At the end of each journey subjects were asked to assess the journey as a whole on the slider and the comfort questionnaire (see section 2.3).

In the laboratory experiment the study groups remained in the same constellation. In order to prevent biased comfort assessments subjects were not briefed about what will be investigated in the laboratory setting. The recorded pressure profiles of the corresponding field experiments were reproduced one-to-one within the pressure chamber. Additionally subjects were exposed to the train noise that had occurred during the real journey. This was meant to create a comparable and realistic atmosphere. Here as well subjects not only assessed the pressure profile continuously, but furthermore retrospectively on the slider and the comfort questionnaire. To guarantee high comparability, subjects were given equivalent time to eat and relax between both simulated directions of travel.

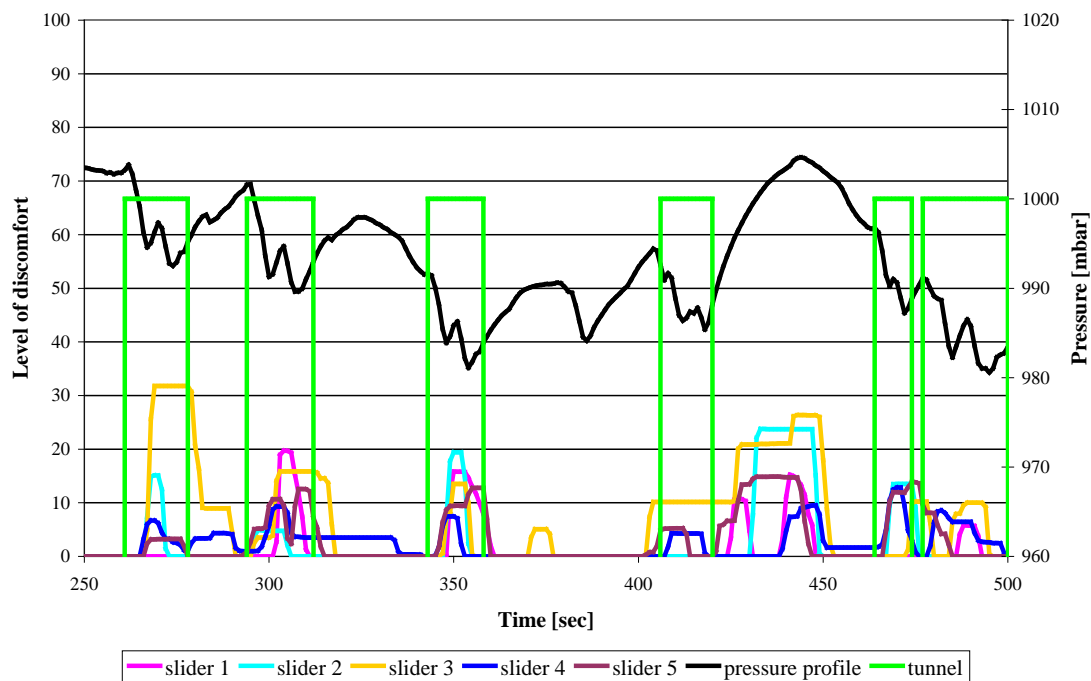
Keeping the subjectivity of comfort sensations in mind subjects were instructed to assess the actual comfort/discomfort completely on their own. They were told not to



orientate on adjustments of other subjects. Furthermore subjects were advised not to eat, drink or talk during the experiment but to really concentrate on pressure variations and the degree of experienced discomfort. Given the fact that swallowing makes pressure equalization easier, the consumption of food, drinks and chewing gums was not allowed throughout the measurement.

## 2.5 Data preparation

The recorded data stream of each study group had a length of approximately 80 minutes. Figure 3 visualizes an extract from the pressure profile of one specific journey as well as the corresponding discomfort assessments of the subjects using sliders.



*Figure 3: Extract from the pressure profile of one specific journey (seconds 250 to 500) and the corresponding discomfort assessments using sliders.*

Recorded pressure profiles were manually scored by independent evaluators. Purpose of the scoring procedure was to identify noticeable pressure variations due to tunnels or differences in ground level heights based on the route data to provide a first data reduction. The identified pressure variations were examined with respect to consistent criteria. Across the evaluators pressure variations with a minimum amplitude of 5 mbar and additionally a minimum rate of pressure change (defined as mbar per

second) of 0.3 mbar/s were considered as noticeable events. Furthermore, pressure changes occurring immediately after an event that had been rated as relevant for perception were included as long as 40% or more of the former pressure amplitude and again a minimum rate of pressure change of 0.3 mbar/s were given. In a second step we used these criteria for a computerized selection by means of a Visual Basic program. Pressure variations occurring one after another (separated by not more than 4 s) that were characterized by nearly the same rate of pressure change ( $\pm 0.1$  mbar/s difference) with the same direction of pressure change (pressure increase/ pressure decrease) were automatically bonded and treated as being one event. The digital values of the sliders were manually allocated to the pressure variation that occurred immediately before the adjustment was changed.

### 3 Results

#### 3.1 Descriptive results — noticeable pressure events

Based on the data preparation procedure the number of selected pressure events ranged from 45 to 83 noticeable events per study group and direction of travel. The amplitudes of pressure increases selected for further analysis varied between 2.3 mbar and 26.6 mbar ( $M = 9.0$ ,  $SD = 4.7$ ). The pressure decreases ranged from -2.2 mbar to -22.8 mbar at maximum ( $M = -8.0$ ,  $SD = 3.7$ ). The pressure increases had a duration of between 2 and 57 seconds ( $M = 13.7$ ,  $SD = 8.8$ ). The duration of pressure decreases varied between 2 and 36 seconds ( $M = 6.9$ ,  $SD = 4.5$ ). The maximum rate of pressure change for pressure increases reached a value of 2.4 mbar/s ( $M = 0.8$ ,  $SD = 0.4$ ) whereas the maximum value for pressure decreases was much higher with a value of -4.24 mbar/s ( $M = -1.4$ ,  $SD = 0.6$ ). Figure 4 illustrates all noticeable pressure events of all study groups that had occurred on the railway line from Siegburg to Frankfurt/Main. As visualized, pressure decreases took place within a shorter time period than pressure increases.

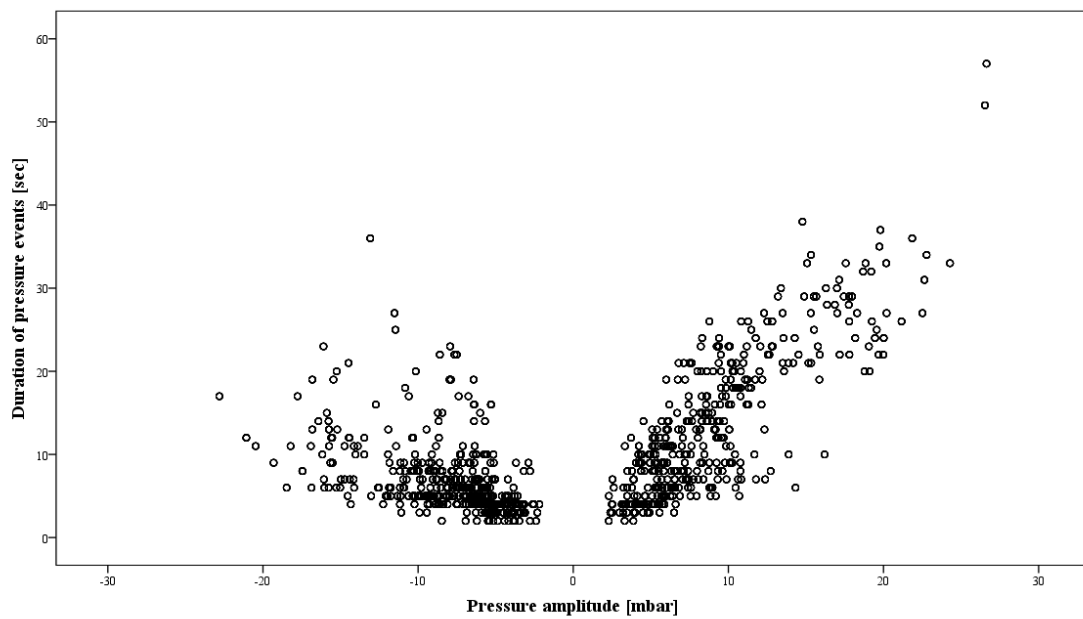


Figure 4: Noticeable pressure events of all study groups that had occurred on the railway line from Siegburg to Frankfurt/Main.

### 3.2 Comparison of field and laboratory setting – continuous assessments

The mean adjustment of the slider within the field setting was located at 17.1% perceived discomfort ( $SD = 22.0$ ). In the laboratory setting the mean slider adjustment was located at a value of 16.8% perceived discomfort ( $SD = 19.5$ ). Figure 5 shows the distribution of slider adjustments correspondent to the quantity of pressure events, illustrated for field and laboratory setting separately.

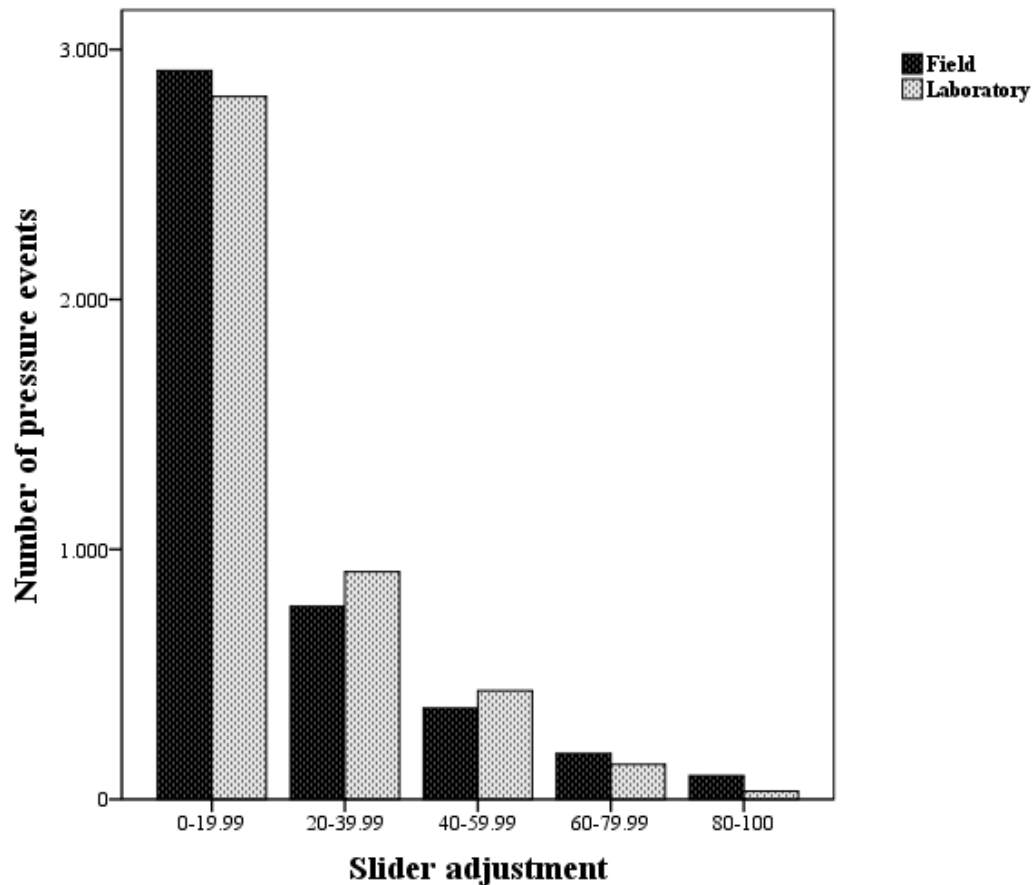
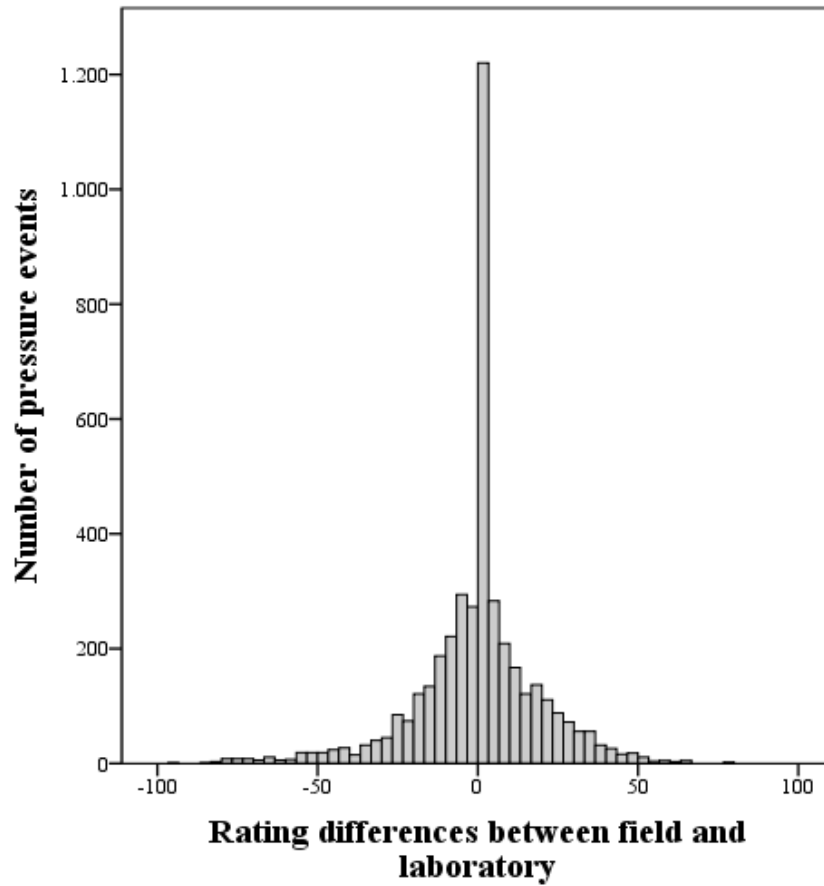


Figure 5: Distribution of slider adjustments correspondent to the number of pressure events, illustrated for field and laboratory setting separately.

Figure 6 visualizes rating differences between field and laboratory setting correspondent to the quantity of pressure events. Obviously, rating differences are predominantly close to zero. A Kolmogorov-Smirnov test showed that both the slider adjustments in the field and in the laboratory were not normally distributed ( $p < .001$ ). Therefore the Wilcoxon signed-rank test as a non-parametric paired difference test was used including the data of all study groups to examine whether the setting led to significant differences in adjustments of the sliders. No significant differences were found ( $Z = -.62, p = .535$ ).



*Figure 6: Rating differences between field and laboratory setting correspondent to the number of pressure events.*

Figure 7 shows, exemplarily for one study group and direction of travel, mean values of the sliders as responses to in this case 65 noticeable pressure events that had occurred during their real journey and the simulated journey in the pressure chamber.

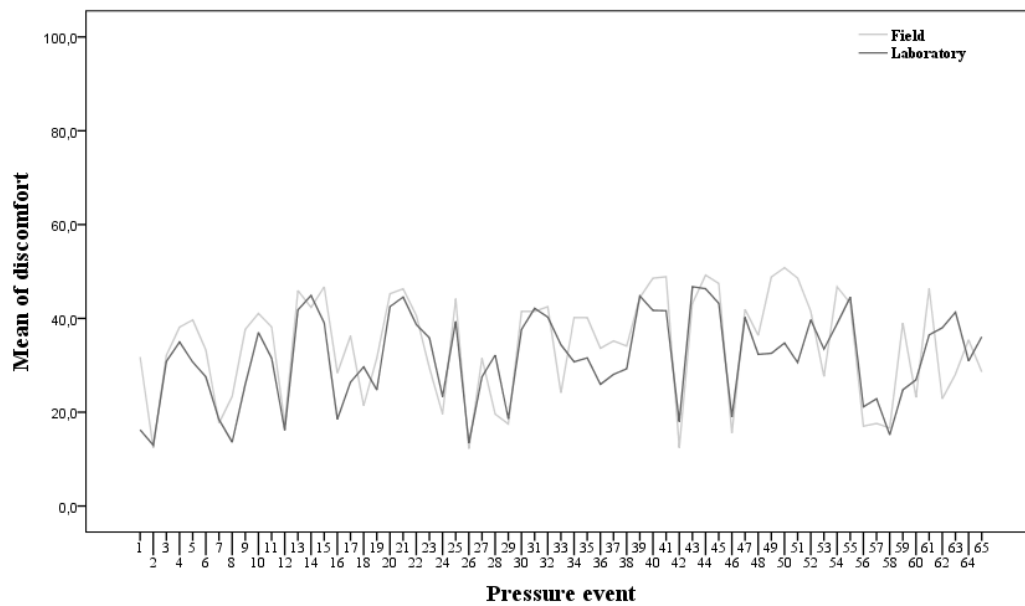


Figure 7: Mean values of sliders, exemplarily for one study group ( $N = 5$ ), in the field and laboratory setting as responses to in this case 65 noticeable pressure events.

### 3.3 Comparison of field and laboratory setting – retrospective assessments

Subjects were asked for an overall adjustment on the slider as well as an evaluation on the questionnaire retrospectively after each journey (both in the real railway carriage and in the pressure chamber). The global adjustment on the slider had a mean value of 20.7% ( $SD = 19.3$ ) in the field and a mean value of 20.8% ( $SD = 18.7$ ) in the laboratory setting. A t-test for paired samples showed no significant differences ( $p = .962$ ). The retrospective evaluation on the questionnaire (seven-point rating scale from “0 = not at all uncomfortable” to “6 = extremely uncomfortable”) had a mean value of 2.3 ( $SD = 1.0$ ) in the field setting and a mean value of 2.4 ( $SD = 1.0$ ) in the laboratory setting. Due to the result of the Kolmogorov-Smirnov test that the differences of these values were not normally distributed ( $p < .01$ ), the Wilcoxon signed-rank test was applied. Here as well no differences between the global assessments were found in both settings ( $Z = -1.211$ ,  $p = .226$ ).

### 3.4 Comparison of assessment methods

The correlation between the mean slider adjustment of the continuous assessment ( $M = 17\%$ ,  $SD = 20.8$ , see section 3.1) and the overall retrospective assessment on the slider ( $M = 20.8\%$ ,  $SD = 18.9$ ) reached a value of  $r = .78$  ( $p < .001$ ). The overall retrospective assessment on the questionnaire ( $M = 2.4$ ,  $SD = 1.0$ ) showed a correlation of  $r = .73$  ( $p < .001$ ) with the retrospective assessment on the slider.

### 3.5 Results of a generalized estimating equation (GEE)

A generalized estimating equation model (GEE) was calculated to investigate the impact of pressure change attributes on the assessment of pressure comfort in the field and laboratory setting. This regression-based method is used to analyze repeated measures when the residuals of the outcome variables are not normally distributed (Zeger & Liang, 1986). The correlation structure was modeled as exchangeable. As relevant descriptors for pressure changes, pressure amplitude in mbar (absolute value) and duration of pressure change in seconds were incorporated in the modeling process. Furthermore, the rate of pressure change (absolute value) was included. This variable accounts for the relation of pressure amplitude and duration, as it is defined as mbar per second. Moreover, the sign of a pressure change (dummy coded, 1 = increase) was incorporated as further pressure change attribute. To take the most recent time period of experience into account, the model also included the sign of the prior pressure change (dummy coded; 1 = same sign). Additionally the impact of the prior rate of pressure change (absolute value) was analyzed. The degree of influence of the prior rate of pressure change on the assessment of an actual pressure change has been time corrected. The time correction was done following experience-based assumptions as well as observations of the experimenters and transformed into a mathematical expression. The time correction was calculated using the following equation:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq x \leq 1 \\ \exp(-1/4(x-1)) & \text{for } 1 < x \leq 10 \\ 0 & \text{for } x > 10 \end{cases} \quad (1)$$

Those pressure changes that occurred immediately before an actual pressure change (1 s before) were totally considered, assuming that they influence the perception of an actual pressure change with full impact (first case of equation (1)). The decay function for

more than one up to ten seconds lying between a prior and an actual pressure change refers to the postulation that the impact of a prior pressure event more and more declines with time passing (second case of equation (1)). All events that occurred more than 10 s before an actual pressure change were not considered at all based on the assumption that for healthy persons, pressure equalization should have been successful within a maximum of 10 s after a pressure event (third case of equation (1)).

The experimental setting, dummy coded with “0” = laboratory and “1” = field, was also tested as a further covariate that could have contributed to the explanation of variance of the dependent variable. This variable led only to a slight change of the intercept and showed no significant impact at all ( $p = .887$ ). Furthermore all interaction terms of the setting with the other variables of the model were not significant (all  $p > .05$ ). Therefore, the variable indicating the setting was excluded from the regression analysis. Table 1 shows the results of the generalized estimating equation model.

*Table 1: Generalized estimating equation model (GEE) for field and laboratory data of 31 subjects. Impact of pressure change parameters on discomfort assessments (positive coefficient corresponds to higher discomfort).*

	Coefficient	Standard error	p-value
Intercept	7.940	2.4460	< .01
Pressure amplitude (absolute value)	.922	.1454	< .001
Rate of pressure change (absolute value)	2.501	.5773	< .001
Duration of pressure change	-.310	.0955	< .01
Sign (dummy coded; 1 = increase)	-5.980	1.3192	< .001
Prior rate of pressure change (absolute value/ time corrected)	3.168	.3442	< .001
Sign of prior pressure change (dummy coded; 1 = same sign)	1.911	.4595	< .001
Rate of pressure change (absolute value) x sign	4.560	1.0786	< .001

Obviously, higher pressure amplitudes (absolute value) lead to a significantly higher adjustment on the slider meaning stronger feelings of discomfort. Longer lasting pressure changes cause significantly lower slider adjustments than short ones.



Furthermore, higher rates of pressure changes (absolute value) are significantly connected to higher adjustments on the sliders. The sign of a pressure change shows a significantly higher discomfort assessment for pressure decreases.

If the sign of two pressure changes followed by each other is the same (both either decrease or increase), the adjustment on the slider is significantly higher than for pressure changes with opposite signs. In comparison of having perceived no relevant prior pressure change (prior rate of pressure change = 0) a prior pressure event with a rate of 2 mbar/s (time corrected) leads to an additional rise in the slider of about 6%, for instance.

Besides these main effects, the model entails a significant interaction between the rate of a pressure change (absolute value) and the sign of a pressure change. For higher rates of pressure changes a positive sign meaning an increase in pressure leads to even higher slider adjustments, i.e. stronger feelings of discomfort. The main effect of the sign is therefore reversed for sufficiently high rates of pressure changes (Figure 8). If the rate of pressure change exceeds approximately 1.3 mbar/s, pressure increases cause higher discomfort compared to pressure decreases.

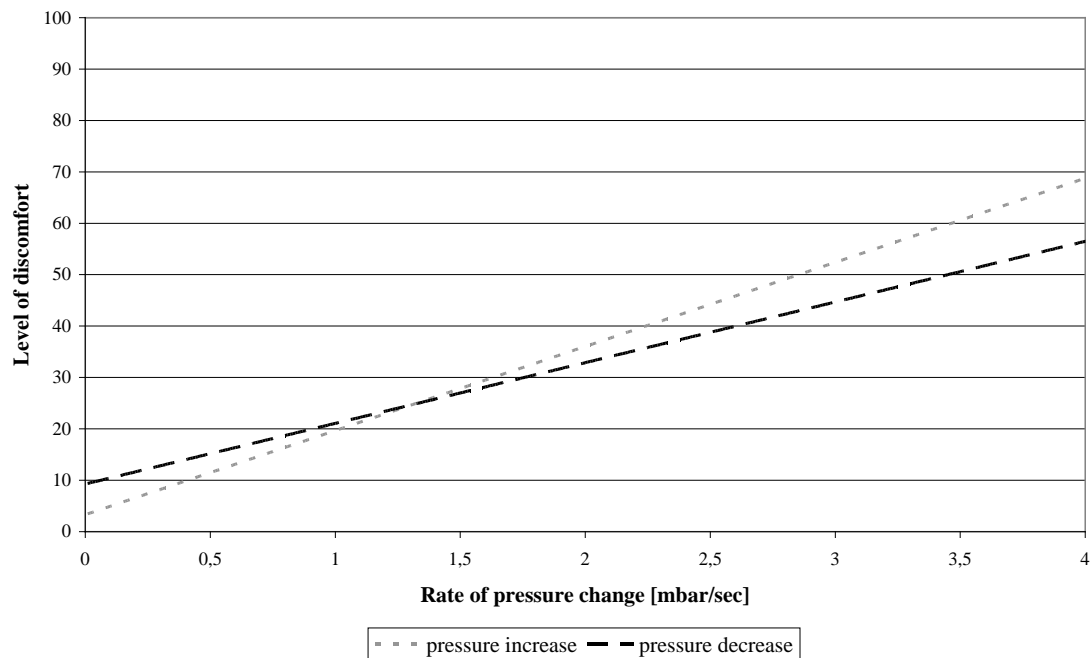


Figure 8: Interaction between rate of pressure change and sign of pressure change and their impact on passengers' level of discomfort. Assumptions: same sign of prior pressure change, prior rate of pressure change (time corrected) = 0.80 (mean).

## 4 Discussion

In particular with regard to the competition with other modes of transport, passengers' satisfaction regarding comfort on a train seems to become a key issue (Richards et al., 1978). The results of the present field and laboratory study may provide insights into the current pressure comfort situation for railway passengers. Furthermore, the study comprises different experimental settings as well as assessment methods giving hints for the choice of adequate methodological approaches. Specific pressure change attributes that contribute to sensations of discomfort are identified and can be considered by design engineers regarding the sealing of trains or the construction of tunnels.

### 4.1 Status quo of pressure comfort

The descriptive results according to mean slider adjustments give a hint that currently railway passengers seem to tolerate pressure variations on a train. The mean adjustment did not exceed the lower fifth of possible discomfort adjustments both in the field and laboratory setting. The investigation of healthy subjects provides information regarding the impact of specific pressure change attributes on sensations of discomfort unaffected by factors making pressure equalization harder (i.e. minor or major ear disorders). Investigating sensible groups like people suffering from ear problems, children or persons having a cold would be a further worthwhile research project. It can be assumed that the sensation of discomfort would be stronger. By comparing healthy and vulnerable subjects the additional effect of having problems with equalizing pressure would become obvious and could be distinguished from the general relationship between pressure change attributes and discomfort assessments.

What has to be taken into account when interpreting the results is that adjusting discomfort assessments on the slider continuously was a highly concentrative task. Subjects had to permanently introspect their perception of pressure on the ear which means high effort regarding the duration of approximately 40 experimental minutes in each journey direction. Effects like mental fatigue and a loss of motivation may have occurred in the end of each part of the experimental test sections.

## **4.2 Effect of experimental setting**

A further, methodological research question was whether laboratory studies lead to equivalent results compared to more expensive, time-consuming and less controllable field experiments in a natural train environment. A Wilcoxon signed-rank test revealed that mean slider adjustments in the field and laboratory setting did not differ significantly. Not only the continuous assessments but also the retrospective assessments on the sliders and additionally on the rating scale showed comparable results between both settings. This fact supports the ecological validity of experiments in the pressure chamber TITAN of the Institute of Aerospace Medicine. It provides the possibility to examine future pressure scenarios in the pressure chamber that are only investigatable within such a laboratory surrounding at a particular time.

## **4.3 Comparison of assessment methods**

The continuous assessment and the retrospective assessment, both adjusted on the slider, correlated significantly. Descriptively, the overall retrospective adjustment was slightly higher meaning more discomfort. This could be a result of memory effects. The arithmetic mean kind of “remembers” both sequences within the journey where the slider had high adjustments and those with low or even the lowest adjustments. Human memory, however, follows different rules. For instance, it disproportionately relates its retrospective judgment on peaks and the end of a sequence. This effect is known as peak-and-end rule and could be shown in connection with sensations of pain (Schneider, Stone, Schwartz & Broderick, 2011). The mean retrospective slider adjustment was also significantly correlated to the mean assessment on the rating scale. Thus, as a retrospective method the questionnaire revealed similar results, but of course cannot be applied with such a high continuity as the slider and is therefore only useful as an instrument for more global assessments of journey sections. If specific pressure changes and their impact on sensations of discomfort are in the focus of interest, the continuous judgment using sliders should be the method of choice.

## **4.4 Impact of specific pressure change attributes**

The impact of specific pressure change attributes on discomfort assessments was analyzed by conducting a generalized estimating equation model. It could be shown

that higher amplitudes, shorter durations and consequently higher rates of pressure changes resulted in higher slider adjustments meaning stronger feelings of discomfort. The main effect of the sign of pressure changes indicated higher discomfort due to pressure decreases than pressure increases. If looking at the significant interaction term between sign and rate of pressure change (absolute value) it could be shown that the effect is reversed for rates of pressure changes lying above approximately 1.3 mbar/s. For this range of values, pressure increases caused significantly more discomfort than pressure decreases which is in accordance with physiological evidence. Pressure decreases are better equalizable than pressure increases by human beings because the middle ear is ventilated automatically in the case of a pressure decrease (Gawthorpe, 2000). In the case of a pressure increase the equalization has to be actively supported (yawning, swallowing). In addition to attributes of actual pressure changes the history of pressure events also contributed to passengers' feelings of discomfort. The most comfortable situation was the one having experienced no prior pressure change at all. The most uncomfortable situation was that of a prior pressure change having the same sign as an actual pressure change and therefore leading to a cumulative effect. Moreover, a higher prior rate of pressure change influenced the assessment of an actual pressure change significantly leading to higher discomfort. The time correction for the determination of impact weights of prior pressure changes was included in the modeling process due to the assumption that for processing sensory stimuli it should make a difference how much time had already passed by between the prior and the actual one. If excluding the time corrected prior rate of pressure change (absolute value) from the analysis, the impact of the other variables remained basically the same. The goodness of fit of the adjusted model (without the time corrected variable), indicated by the corrected quasi-likelihood information criterion (QICC), became even worse. This result supports the value of the presented model. The most adequate way for a time correction due to the impact of prior pressure events may be systematically validated in a further laboratory experiment. Different weighting functions and time parameters could be compared to find out in which way and how fast influences of previous pressure events on the assessment of actual events decline. This knowledge would help design engineers to evaluate pressure profiles of tunnels not only due to isolated pressure events. They would get an impression of how effects on discomfort may accumulate and if countermeasures should be taken to minimize the extent of pressure

changes that reach the interior of a railway carriage. Possibilities to do so (like better sealings of trains, installing air shafts etc.) have to be weighted against dissatisfaction of passengers experiencing pressure discomfort.

## **5 Conclusions**

Certainly, the result of high congruency in both experimental settings cannot be generalized unrestrictedly. It has to be further validated considering different train routes, vulnerable groups instead of healthy subjects and so forth. Nevertheless, the findings show that the investigation of pressure comfort experiments in the laboratory seem to be a suitable alternative to more expensive and considerably less controllable field experiments. With regard to future scenarios the laboratory is the only way of examination, so it is useful to know that these results seem to be comparable to those found in real train environments.

If aspiring to obtain information on the process of judging over time the use of sliders is the appropriate way. Questionnaires, on the other hand, are more convenient examining the effect of single pressure events to determine thresholds to discomfort regarding specific pressure changes as well as acquiring the evaluation of entire journey sections as a whole. Generally speaking, the choice of using sliders or questionnaires or a combination of both has to be decided case-by-case dependent on the nature of the research question.

Contextually, the generalized estimating equation model revealed pressure change attributes contributing to higher discomfort. Not only attributes of instantaneous pressure changes determine pressure comfort sensations of railway passengers. An interesting result which could be revealed by using sliders is the impact of the pressure history on current discomfort assessments. These findings may provide hints for design engineers to initiate promising countermeasures reducing passenger discomfort.

### *Acknowledgements*

We would like to thank Alex Hoff, Norbert Luks, Sibylle Pennig, Gernot Plath, Julia Quehl, Stefan Schmitt and Jürgen Wenzel for their support of this work. The studies were part of the DLR-project “Next Generation Train”. This work will be submitted to Technische Universität Darmstadt as part of a doctoral thesis under supervision of Professor Joachim Vogt, Work and Engineering Psychology group.

### *References*

- Gawthorpe, R.G. (2000). Pressure effects in railway tunnels. *Rail International*, 31, 10-17.
- Hagenah, B., & Reinke, P. (2006). Effectiveness of pressure relief shafts – full scale assessment. *China International Symposium & Exhibition on High Speed Railway Tunnels*, Beijing, China.
- Kobayashi, M., Suzuki, Y., Akutsu, K., & Ozawa, S. (1998). Alleviating aural discomfort of passengers on Shinkansen by controlling airflow rate in ventilation system. *JSME International Journal – Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 41, 936-944.
- Kuwano, S., & Namba, S. (1985). Continuous judgment of level-fluctuating sounds and the relationship between overall loudness and instantaneous loudness. *Psychological Research*, 47, 27-37.
- Kuwano, S., Namba, S., & Fastl, H. (1988). Judgment of loudness, noisiness, and annoyance with actual and artificial noises. *Journal of Sound and Vibration*, 127, 457-465.
- McClelland, I.L., & Gawthorpe, R.G. (1986). The response of railway passengers to pressure fluctuations. *Applied Ergonomics*, 17, 305-315.
- Osborne, D.J. (1978). Techniques available for the assessment of passenger comfort. *Applied Ergonomics*, 9, 45-49.
- Onusko, E. (2004). Tympanometry. *American Family Physician*, 70, 1713-1720.
- Richards, L.G. (1980). On the psychology of passenger comfort. In: D.J. Osborne & J.A. Levis (Eds.), *Human Factors in Transport Research* (pp. 15-23). London: Academic Press.

- Richards, L.G., Jacobson, I.D., & Kuhlthau, A.R. (1978). What the passenger contributes to passenger comfort. *Applied Ergonomics*, 9, 137-142.
- Schneider, S., Stone, A.A., Schwartz, J.E., & Broderick, J.E. (2011). Peak and end effects in patients' daily recall of pain and fatigue: a within-subjects analysis. *Journal of Pain*, 12, 228-235.
- Suzuki, H. (1998). Research trends on riding comfort evaluation in Japan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 212, 61-72.
- Zeger, S.L., & Liang, K.Y. (1986). Longitudinal data analysis for discrete and continuous outcomes. *Biometrics*, 42, 121-130.



## Anhang

Im Folgenden sind die im Rahmen der Bahnsteigbefragung und der experimentellen Versuche eingesetzten Fragebögen aufgeführt:

- I. Priorisierungsfragebogen der Bahnsteigbefragung
- II. Versuchsbedingung A – retrospektiver Fragebogen zur Feldfahrt (Köln-Frankfurt)
- III. Versuchsbedingung A – retrospektiver Fragebogen zur Feldfahrt (Frankfurt-Köln)
- IV. Versuchsbedingung B – retrospektiver Fragebogen zur Laborfahrt (Simulation Köln-Frankfurt)
- V. Versuchsbedingung B – retrospektiver Fragebogen zur Laborfahrt (Simulation Frankfurt-Köln)
- VI. Versuchsbedingung C – Fragebogen zur Bewertung der generischen Drucksprungprofile

## **Anhang I: Priorisierungsfragebogen der Bahnsteigbefragung**



#### HINWEISE ZUM AUSFÜLLEN DES FRAGEBOGENS

Wir sind Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Am Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin untersuchen wir, welche Faktoren zum KOMFORTEMPFINDEN IN DER BAHN beitragen.

Der vorliegende Fragebogen dient dazu, Informationen über Ihre bisherigen **ERFAHRUNGEN** und **EINSTELLUNGEN ZUM BAHNFAHREN** sowie Ihre persönlichen **ERWARTUNGEN** an eine **KOMFORTABLE BAHNFAHRT** zu erhalten.

Bitte beantworten Sie alle Fragen vollständig und zügig. Sollten Sie bei einigen Fragen Schwierigkeiten haben sich festzulegen, wählen Sie bitte die Antwort, die Ihren Erfahrungen am ehesten entspricht. Bitte kreuzen Sie immer nur eine Alternative an.

Das Ausfüllen des Fragebogens nimmt etwa 5-10 Minuten in Anspruch. Der Fragebogen ist anonym und kann nicht mit Ihrer Person in Verbindung gebracht werden. Für Rückfragen stehen wir Ihnen unter folgender Anschrift zur Verfügung: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut ME-FP, 51170 Köln.

Bitte schicken Sie den ausgefüllten Fragebogen möglichst innerhalb von 10 Tagen in dem vorbereiteten Rückumschlag an uns zurück. Bitte beschriften Sie weder Fragebogen noch Rückumschlag mit Ihrem Namen, um die Anonymität Ihrer Daten zu gewährleisten.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



ANGABEN ZUR PERSON	
1	Alter _____ Jahre
2	Geschlecht <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich
3	Berufsausbildung <input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Lehre <input type="checkbox"/> Meisterschule <input type="checkbox"/> Fachhochschule <input type="checkbox"/> Hochschule
4	Derzeitiger Beruf _____
5	Am häufigsten nutze ich die Bahn... <input type="checkbox"/> für Dienstreisen <input type="checkbox"/> als Berufspendler <input type="checkbox"/> zu privaten Zwecken
5.1	Wie häufig fahren Sie <i>im Rahmen einer Dienstreise</i> pro Jahr im Durchschnitt mit der Bahn (Hin- und Rückfahrt = 2)? _____ Fahrten
5.2	Wie häufig fahren Sie <i>als Berufspendler</i> pro Jahr im Durchschnitt mit der Bahn (Hin- und Rückfahrt = 2)? _____ Fahrten
5.3	Wie häufig fahren Sie <i>zu privaten Zwecken</i> pro Jahr im Durchschnitt mit der Bahn (Hin- und Rückfahrt = 2)? _____ Fahrten
6	In der Regel buche ich Fahrkarten der... <input type="checkbox"/> 1. Klasse <input type="checkbox"/> 2. Klasse

EINSTELLUNG ZUM BAHNFAHREN						
7	Bitte geben Sie an, inwieweit folgende Aussagen auf Sie zutreffen.	0 = stimmt gar nicht	1 = stimmt nicht	2 = unentschieden	3 = stimmt	4 = stimmt genau
7.1	Ich fahre sehr gerne mit der Bahn.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.2	Ich fahre nur mit der Bahn, wenn es unbedingt sein muss.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.3	Ich mag Bahnfahren überhaupt nicht.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.4	Ich habe keine besondere Einstellung gegenüber dem Bahnfahren.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.5	Ich meide die Toilette im Zug.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.6	Die Enge im Zug stört mich.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.7	Mir ist im Zug übel.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.8	Die vielen Menschen im Zug stören mich.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
7.9	Ich gerate im Zug schnell in Panik.	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4



KOMFORT & WOHLBEFINDEN BEIM BAHNFAHREN						
8	Bitte geben Sie an, <u>wie relevant</u> folgende Faktoren in Bezug auf Ihren Komfort und Ihr Wohlbefinden beim Bahnfahren sind.	0 = nicht	1 = wenig	2 = mittelmäßig	3 = ziemlich	4 = sehr
8.1	Temperatur	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.2	Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.3	Beleuchtung	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.4	Lärm	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.5	Luftdruck	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.6	Vibrationen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.7	Zugbewegungen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.8	Sitz	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.9	Beinfreiheit	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.10	Arbeitsfläche	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.11	Luftqualität	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.12	Geruch	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.13	Belüftung	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.14	Service	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
8.15	Gibt es noch andere wichtige Faktoren?	<input type="text" value="1"/> nein		<input type="text" value="2"/> ja		
8.16	Wenn ja, welche?	<div></div> <div></div>				



AKTIVITÄTEN IM ZUG						
9	Welchen Aktivitäten gehen Sie normalerweise im Zug nach?	0 = nie	1 = selten	2 = manchmal	3 = häufig	4 = immer
9.1	Lesen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.2	Schlafen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.3	Unterhalten	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.4	Essen & Trinken	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.5	Arbeiten	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.6	Entspannen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.7	Schreiben	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.8	Nachdenken	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.9	Fernsehen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.10	Tagträumen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.11	Aus dem Fenster sehen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.12	Musik hören	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.13	Im Gang laufen	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>
9.14	Gibt es noch weitere wichtige Aktivitäten, denen Sie im Zug nachgehen?	<input type="text" value="1"/> nein <input type="text" value="2"/> ja				
9.15	Wenn ja, welche?	<hr/> <hr/>				

## **Anhang II: Versuchsbedingung A – retrospektiver Fragebogen zur Feldfahrt (Köln-Frankfurt)**



VP-Kennung

NGT, Datum

## FRAGEBOGEN ZUM GESAMTEINDRUCK: KÖLN – FRANKFURT

Ergänzend zur kontinuierlichen Bewertung durch den Schieberegler und Einstellung der Gesamtbewertung am Schieberegler erfasst der vorliegende Fragebogen Informationen über Ihren **GESAMTEINDRUCK** hinsichtlich der gefahrenen Zugstrecke von Köln nach Frankfurt.

## KOMFORT &amp; WOHLBEFINDEN BEIM BAHNFAHREN

1	Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie die Strecke in Bezug auf folgende Faktoren empfunden haben:	0 = überhaupt nicht unangenehm	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst unangenehm
1.1	Luftdruck	0	1	2	3	4	5	6
1.2	Lärm	0	1	2	3	4	5	6
1.3	Bewegung/Vibration	0	1	2	3	4	5	6
1.4	Temperatur	0	1	2	3	4	5	6
1.5	Luftqualität	0	1	2	3	4	5	6
1.6	Gesamt	0	1	2	3	4	5	6



Gibt es noch andere wichtige Faktoren, die Ihr Komfortempfinden maßgeblich beeinflusst haben?		<input type="checkbox"/> 1 nein <input type="checkbox"/> 2 ja						
2.0	Wenn ja, bitte geben Sie den jeweiligen Komfortfaktor an und bewerten Sie auch hier, <u>wie unangenehm</u> Sie die Strecke in Bezug auf den jeweiligen Faktor empfunden haben:							
		0 = überhaupt nicht unangenehm	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst unangenehm
2.1	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.2	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.3	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.4	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.5	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.6	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6

## **Anhang III: Versuchsbedingung A – retrospektiver Fragebogen zur Feldfahrt (Frankfurt-Köln)**



VP-Kennung

NGT, Datum

### FRAGEBOGEN ZUM GESAMTEINDRUCK: FRANKFURT — KÖLN

Ergänzend zur kontinuierlichen Bewertung durch den Schieberegler und Einstellung der Gesamtbewertung am Schieberegler erfasst der vorliegende Fragebogen Informationen über Ihren **GESAMTEINDRUCK** hinsichtlich der gefahrenen Zugstrecke von Frankfurt nach Köln.

### KOMFORT & WOHLBEFINDEN BEIM BAHNFAHREN

1	Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie die Strecke in Bezug auf folgende Faktoren empfunden haben:						
		0 = überhaupt nicht unangenehm	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr 6 = äußerst unangenehm
1.1	Luftdruck	0	1	2	3	4	5 6
1.2	Lärm	0	1	2	3	4	5 6
1.3	Bewegung/Vibration	0	1	2	3	4	5 6
1.4	Temperatur	0	1	2	3	4	5 6
1.5	Luftqualität	0	1	2	3	4	5 6
1.6	Gesamt	0	1	2	3	4	5 6

Gibt es noch andere wichtige Faktoren, die Ihr Komfortempfinden maßgeblich beeinflusst haben?		<input type="checkbox"/> 1 nein <input type="checkbox"/> 2 ja						
2.0	Wenn ja, bitte geben Sie den jeweiligen Komfortfaktor an und bewerten Sie auch hier, <b>wie unangenehm</b> Sie die Strecke in Bezug auf den jeweiligen Faktor empfunden haben:	0 = überhaupt nicht unangenehm      1 = nicht      2 = wenig      3 = mittelmäßig      4 = ziemlich      5 = sehr      6 = äußerst unangenehm						
2.1	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.2	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.3	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.4	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.5	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.6	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6

## **Anhang IV: Versuchsbedingung B – retrospektiver Fragebogen zur Laborfahrt (Simulation Köln- Frankfurt)**



VP-Kennung

NGT, Datum

### FRAGEBOGEN ZUM GESAMTEINDRUCK: LABORVERSUCH TEIL I

Ergänzend zur kontinuierlichen Bewertung durch den Schieberegler und Einstellung der Gesamtbewertung am Schieberegler erfasst der vorliegende Fragebogen Informationen über Ihren **GESAMTEINDRUCK** hinsichtlich der in der Druckkammer abgefahrenen Strecke.

### KOMFORT & WOHLBEFINDEN BEIM BAHNFAHREN

1	Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie die Strecke in Bezug auf folgende Faktoren empfunden haben:	0 = überhaupt nicht <u>unangenehm</u> 1 = nicht      2 = wenig      3 = mittelmäßig      4 = ziemlich      5 = sehr      6 = äußerst <u>unangenehm</u>						
1.1	Luftdruck	0	1	2	3	4	5	6
1.2	Lärm	0	1	2	3	4	5	6
1.3	Temperatur	0	1	2	3	4	5	6
1.4	Luftqualität	0	1	2	3	4	5	6
1.5	Gesamt	0	1	2	3	4	5	6

Gibt es noch andere wichtige Faktoren, die Ihr Komfortempfinden maßgeblich beeinflusst haben?		<input type="checkbox"/> 1 nein <input type="checkbox"/> 2 ja						
2.0	Wenn ja, bitte geben Sie den jeweiligen Komfortfaktor an und bewerten Sie auch hier, <u>wie unangenehm</u> Sie die Strecke in Bezug auf den jeweiligen Faktor empfunden haben:							
		0 = überhaupt nicht unangenehm	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst unangenehm
2.1	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.2	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.3	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.4	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.5	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.6	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6

## **Anhang V: Versuchsbedingung B – retrospektiver Fragebogen zur Laborfahrt (Simulation Frankfurt- Köln)**





VP-Kennung

NGT, Datum

### FRAGEBOGEN ZUM GESAMTEINDRUCK: LABORVERSUCH TEIL II

Ergänzend zur kontinuierlichen Bewertung durch den Schieberegler und Einstellung der Gesamtbewertung am Schieberegler erfasst der vorliegende Fragebogen Informationen über Ihren **GESAMTEINDRUCK** hinsichtlich der in der Druckkammer abgefahrenen Strecke.

#### KOMFORT & WOHLBEFINDEN BEIM BAHNFAHREN

1	Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie die Strecke in Bezug auf folgende Faktoren empfunden haben:	0 = überhaupt nicht <u>unangenehm</u>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <u>unangenehm</u>
1.1	Luftdruck	0	1	2	3	4	5	6
1.2	Lärm	0	1	2	3	4	5	6
1.3	Temperatur	0	1	2	3	4	5	6
1.4	Luftqualität	0	1	2	3	4	5	6
1.5	Gesamt	0	1	2	3	4	5	6

Gibt es noch andere wichtige Faktoren, die Ihr Komfortempfinden maßgeblich beeinflusst haben?		<input type="checkbox"/> 1 nein <input type="checkbox"/> 2 ja						
2.0	Wenn ja, bitte geben Sie den jeweiligen Komfortfaktor an und bewerten Sie auch hier, wie unangenehm Sie die Strecke in Bezug auf den jeweiligen Faktor empfunden haben:							
		0 = überhaupt nicht unangenehm	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst unangenehm
2.1	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.2	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.3	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.4	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.5	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6
2.6	_____	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6

## **Anhang VI: Versuchsbedingung C – Fragebogen zur Bewertung der generischen Drucksprungprofile**



VP-Kennung

NGT, Datum

#### FRAGEBOGEN ZU LUFTDRUCKSCHWANKUNGEN

Der vorliegende Fragebogen erfasst Informationen zu Ihrem Komfortempfinden hinsichtlich der dargebotenen Luftdruckschwankungen.

Es werden 6 Blöcke bestehend aus jeweils 10 Abschnitten präsentiert. Jeder Abschnitt wird zunächst einzeln bewertet, im Anschluss erfolgt eine Gesamtbewertung des ganzen Blocks.

Die Zeitpunkte, zu denen eine Bewertung durch Ankreuzen eines Kästchens abgegeben werden soll, werden durch ein akustisches Signal angekündigt.



1. Block: Einzelbewertungen							
Bitte geben Sie an, <u>wie</u> <u>unangenehm</u> Sie jeden einzelnen Streckenabschnitt in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
1. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
2. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
3. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
4. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
5. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
6. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
7. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
8. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
9. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
10. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6



1. Block: Gesamtbewertung						
Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie den gesamten 1. Block in Bezug auf <u>Luftdruckschwankungen</u> empfunden haben:	<div>0 = überhaupt nicht unangenehm</div> <div>1 = nicht</div> <div>2 = wenig</div> <div>3 = mittelmäßig</div> <div>4 = ziemlich</div> <div>5 = sehr</div> <div>6 = äußerst unangenehm</div>					
	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>



2. Block: Einzelbewertungen							
Bitte geben Sie an, <u>wie</u> <u>unangenehm</u> Sie jeden einzelnen Streckenabschnitt in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
1. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
2. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
3. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
4. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
5. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
6. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
7. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
8. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
9. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
10. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>



2. Block: Gesamtbewertung						
Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie den gesamten 2. Block in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:	<div>0 = überhaupt nicht unangenehm</div> <div>1 = nicht</div> <div>2 = wenig</div> <div>3 = mittelmäßig</div> <div>4 = ziemlich</div> <div>5 = sehr</div> <div>6 = äußerst unangenehm</div>					
	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>





3. Block: Einzelbewertungen							
Bitte geben Sie an, <u>wie</u> <u>unangenehm</u> Sie jeden einzelnen Streckenabschnitt in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
1. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
2. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
3. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
4. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
5. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
6. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
7. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
8. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
9. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
10. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>



3. Block: Gesamtbewertung							
Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie den gesamten 3. Block in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



4. Block: Einzelbewertungen							
Bitte geben Sie an, <u>wie</u> <u>unangenehm</u> Sie jeden einzelnen Streckenabschnitt in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
1. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
2. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
3. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
4. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
5. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
6. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
7. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
8. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
9. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
10. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6



4. Block: Gesamtbewertung						
Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie den gesamten 4. Block in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:	<div>0 = überhaupt nicht unangenehm</div> <div>1 = nicht</div> <div>2 = wenig</div> <div>3 = mittelmäßig</div> <div>4 = ziemlich</div> <div>5 = sehr</div> <div>6 = äußerst unangenehm</div>					
	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>



5. Block: Einzelbewertungen							
Bitte geben Sie an, <u>wie</u> <u>unangenehm</u> Sie jeden einzelnen Streckenabschnitt in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
1. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
2. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
3. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
4. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
5. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
6. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
7. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
8. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
9. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6
10. Abschnitt	0	1	2	3	4	5	6



5. Block: Gesamtbewertung						
Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie den gesamten 5. Block in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:	<div>0 = überhaupt nicht unangenehm</div> <div>1 = nicht</div> <div>2 = wenig</div> <div>3 = mittelmäßig</div> <div>4 = ziemlich</div> <div>5 = sehr</div> <div>6 = äußerst unangenehm</div>					
	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>



6. Block: Einzelbewertungen							
Bitte geben Sie an, <u>wie</u> <u>unangenehm</u> Sie jeden einzelnen Streckenabschnitt in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfundene haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
1. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
2. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
3. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
4. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
5. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
6. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
7. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
8. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
9. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>
10. Abschnitt	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="6"/>



6. Block: Gesamtbewertung							
Bitte geben Sie an, <u>wie unangenehm</u> Sie den gesamten 6. Block in Bezug auf <b>Luftdruckschwankungen</b> empfunden haben:							
	0 = überhaupt nicht <b>unangenehm</b>	1 = nicht	2 = wenig	3 = mittelmäßig	4 = ziemlich	5 = sehr	6 = äußerst <b>unangenehm</b>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



## Wissenschaftlicher Werdegang

Sandra Schwanitz, Dipl.-Psych.

geboren am 19.03.1983 in Siegburg

- |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2002-2008 | <p>Studium der Psychologie an der Universität Koblenz-Landau</p> <p>Schwerpunktfächer: Arbeits-, Betriebs- und Organisationspsychologie; Pädagogische Psychologie; forschungsorientierte Vertiefung: Kommunikationspsychologie; nicht-psychologisches Wahlpflichtfach: Wirtschaftswissenschaften</p> <p>Abschluss: Diplom (Gesamtnote: 1,0)</p> |
| 2007      | <p>Diplomarbeit bei Prof. Dr. G. F. Müller, Universität Koblenz-Landau</p> <p>Titel der Diplomarbeit: „Diagnose unternehmerischer Potentiale – Analyse eines Fragebogens und Typologisierung anhand von Eignungsdimensionen“ (Note: 1,0)</p>                                                                                                    |
| 2009-2011 | <p>Doktorandin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln, Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin</p> <p>Titel der Dissertation: „Der Einfluss von Luftdruckschwankungen im Zug auf den Passagierkomfort – Analyse kontinuierlicher Bewertungen in ICE-3 und Druckkammer sowie Definition von Toleranzgrenzwerten“</p>         |
| seit 2012 | <p>Jungwissenschaftlerin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln, Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin</p>                                                                                                                                                                                                                |

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich gemäß § 9, Abs. 1 der Promotionsordnung der Technischen Universität Darmstadt vom 12. Januar 1990 (in der Fassung der VII. Änderung vom 28. September 2010) die vorliegende Dissertationsschrift selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und die Stellen, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinne nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Köln, den 13. September 2012

---

Dipl.-Psych. Sandra Schwanitz